

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Ptičar

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Martin Ptičar

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na savjetima i pružanoj podršci kroz pripremu i izradu završnog rada.

Hvala asistentici Maji Jurici na velikom strpljenju i ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Hvala tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije i Laboratorija za zaštitu materijala na pomoći izrade ekperimentalnog dijela rada.

Martin Ptičar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN PTIČAR**

Mat. br.: **0035191145**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

MAG CBT ZAVARIVANJE VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA

Naslov rada na
engleskom jeziku:

MAG CBT WELDING OF HIGHALLOYED Cr-Ni STEELS

Opis zadatka:

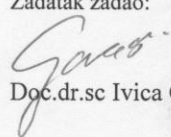
Opisati i analizirati MAG CBT-Control Bridge Transfer prijenos metala u električnom luku i navesti osnovne prednosti i primjenu. Odrediti mogućnost zavarivanja visokolegiranih nehrđajućih čelika MAG CBT postupkom te navesti primjenjive zaštitne plinove. Usporediti zavarivanje impulsnim lukom i CBT prijenosom sa stanovišta štrcanja i utjecaja na kvalitetu površine zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu za odgovarajuću kvalitetu i debljinu osnovnog materijala definirati tehnologiju zavarivanja primjenom MAG CBT prijenosa metala u električnom luku. Analizirati operativne značajke i količinu štrcanja u odnosu na impulsno zavarivanje. Zaključno donijeti preporuke opravdanosti primjene MAG CBT postupka za zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc Ivica Garašić

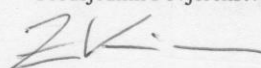
Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE	2
3. CONTROLLED BRIDGE TRANSFER (CBT).....	8
4. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH ČELIKA	20
5. EKSPERIMENTALNI DIO	27
ZAKLJUČAK	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1 MAG zavarivanje [3]	2
Slika 2 Proces taljenja [3].....	2
Slika 3 Prijenos kratkim spojevima [5]	6
Slika 4 Prijenos prijelaznim lukom [5]	7
Slika 5 Prijenos štrcajućim lukom [5]	7
Slika 6 Princip CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [4].....	9
Slika 7 Princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja [4]	10
Slika 8 Faze CBT prijenosa metala ovisno o vremenu [4].....	11
Slika 9 Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu [1].....	13
Slika 10 Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [1]	14
Slika 11 Općeniti valni oblik struje za MAG zavarivanje (lijevo) i valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO ₂ zaštiti [6]	15
Slika 12 Rezultati pojave štrcanja pri CBT-EX MAG i konvencionalnom zavarivanju [6]....	17
Slika 13 Mikrostruktura feritnog čelika [11].....	21
Slika 14 Mikrostruktura austenitnog čelika [11].....	22
Slika 15 Mikrostruktura dupleks čelika [11].....	23
Slika 16 Mikrostruktura martenzitnog čelika [11]	24
Slika 17 Schaeffler-ov dijagram [12]	25
Slika 18 Daihen Varstroj WB P500L [16]	28
Slika 19 Korisničko sučelje WB P500L.....	29
Slika 20 Specifikacija dodatnog materijala [15]	32
Slika 21 Postav eksperimenta za navarivanje	33
Slika 22 Rezultat navarivanja uzorka 1A	37
Slika 23 Rezultat navarivanja uzorka 1B	37
Slika 24 Rezultat navarivanja uzorka 2A	38
Slika 25 Rezultat navarivanja uzorka 2B	38
Slika 26 Izgled površine uzoraka sa stražnje strane	39
Slika 27 Uređaj za brušenje makro uzoraka Phoenix Alpha Grinder/Polisher	40

Slika 28 Postavljanje skale na točnu dimenziju debljine osnovnog materijala u programu ImageJ	41
Slika 29 Mjerenje širine navara pomoću programa ImageJ	42
Slika 30 Mjerenje nadvišenja pomoću programa ImageJ	42
Slika 31 Mjerenje penetracije pomoću programa ImageJ	43
Slika 32 Mjerenje površine pomoću programa ImageJ	43
Slika 33 Grafički prikaz izmjerenih podataka uzoraka 1A i 1B	45
Slika 34 Grafički prikaz izmjerenih podataka uzoraka 2A i 2B	45

POPIS TABLICA

Tablica 1 Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [4].....	11
Tablica 2 Parametri zavarivanja AC-CBT metodom prijenosa metala [1]	14
Tablica 3 Klasifikacija digitalnih invertera [4]	18
Tablica 4 Tehničke karakteristike izvora struje WB P500L	30
Tablica 5 Zaštitni plinovi za zavarivanje i rezanje [13]	31
Tablica 6 Parametri zavarivanja	34
Tablica 7 Kemijski sastav AISI 304 [14]	36
Tablica 8 Geometrijska analiza makroizbrusaka	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
Q	kJ/mm	Unos topline
R	Ω	Električni otpor
t	s	Vrijeme
U	V	Napon
v_z	m/min	Brzina dodavanja žice
η	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja

POPIS KRATICA

Al	Aluminij
AC-CBT	Alternative Current - Control Bridge Transfer
Ar	Argon
CBT	Controlled Bridge Transfer
CBT-EX	Controlled Bridge Transfer - Expanded
CC	Constant Current
CO	Ugljični monoksid
CO ₂	Ugljični dioksid
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
Fe	Željezo
He	Helij
H ₂	Vodik
KV	Konvencionalni način prijenosa metala
MAG	Metal Active Gas
MAG-M	Metal Active Gas Mixture
Mn	Mangan
N ₂	Dušik
O ₂	Kisik
Si	Silicij
STT	Surface Tension Transfer
WB	Welbee
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je; "MAG CBT zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika". Sastoji se od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu obrađen je MAG postupak zavarivanja s detaljnijim objašnjenjem načina prijenosa metala u električnom luku. Analiziran je CBT (Controlled Bridge Transfer) način prijenosa metala, te je napravljena usporedba konvencionalnog impulsnog MAG zavarivanja s MAG CBT načinom. Također, objašnjena je uloga zaštitnog plina kod zavarivanja. Navedena su svojstva i specifičnosti visokolegiranih čelika, te njihova podjela.

U eksperimentalnom dijelu opisani su oprema, osnovni materijal, dodatni materijal i plin koji je korišten. Osmišljen je plan pokusa kojim se mogu usporediti karakteristike električnog luka kod zavarivanja impulsnim načinom prijenosa metala s CBT načinom pri 2 različite brzine dodavanja žice, te su analizirani dobiveni rezultati.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, CBT, visokolegirani čelici

SUMMARY

This bachelor thesis topic is: "MAG CBT welding of high-alloyed Cr-Ni steels". It consists of 2 parts: theoretical and experimental.

Theoretical part contains description of MAG welding principles with emphasis on metal transfer modes through the electric arc. CBT (Controlled Bridge Transfer) metal transfer mode is analyzed and compared to conventional pulse MAG welding. Also, main function of the shielding gas is explained. Properties of the high-alloyed steels are mentioned and classification is presented.

In the experimental part used equipment, base and filler material and shielding gas were described. The experiment was conceived to compare characteristics of the arc in pulse and CBT metal transfer mode. This was achieved by welding with 2 different wire feed speeds. And last, results are analyzed.

Key words: MAG welding, CBT, high-alloyed steels

1. UVOD

MAG-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina je dominantan proces spajanja metala sadašnjosti. Usprkos šezdesetogodišnjoj povijesti nastavljaju se istraživanja i razvoj s ciljem poboljšanja procesa što je dovelo do visoke kvalitete i produktivnosti samog procesa.

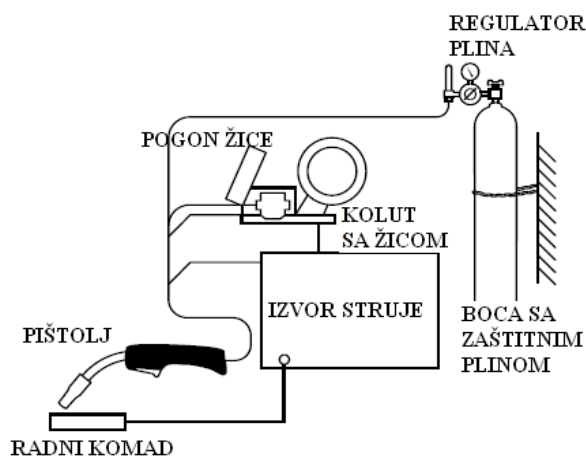
Brojni zahtjevi mogu biti riješeni MAG zavarivanjem, velike i male serije se mogu zavariti na ekonomičan način, a mogu se ispuniti i visoki zahtjevi kakvoće.

MAG zavarivanje primjenjuje se u širokom spektru na različitim konstrukcijama kao što su: čelične konstrukcije, mostovi, automobili, motocikli, izrada strojeva, brodogradnji, platforme, tlačni spremnici i cjevovodi. Kvaliteta zavara ovisi o parametrima zavarivanja i načinu na koji se rukuje opremom za zavarivanje. [2]

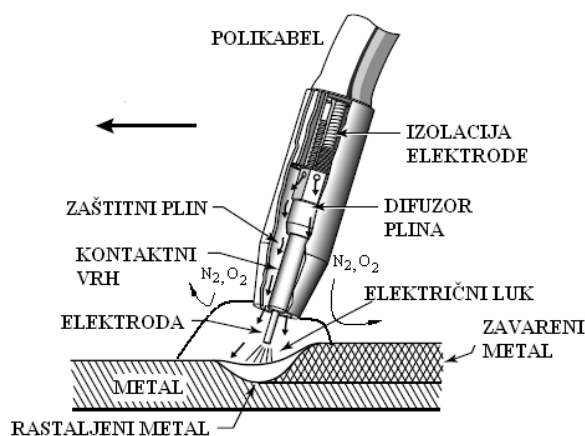
U radu su pobliže opisani načini prijenosa metala pri MAG postupku zavarivanja u svrhu lakšeg razumijevanja principa rada MAG CBT prijenosa metala. Kako bi se u potpunosti vidjele prednosti i nedostaci te primjena CBT prijenosa metala, u radu su još uspoređeni konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojevima i CBT način prijenosa metala sa stanovišta zaštitnih plinova, dodatnih materijala i same primjene. [1]

2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak (koristi se toplina električnog luka za taljenje osnovnog i dodatnog materijala) zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (CO_2) ili njegovih mješavina ($\text{CO}_2 + \text{Ar}$, $\text{O}_2 + \text{Ar}$, $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$). Opremu za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne struje sa ravnom statičkom karakteristikom, polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina. Na slici 1. prikazan je shematski prikaz MAG postupka za zavarivanje, a na slici 2. proces taljenja. [3]



Slika 1 MAG zavarivanje [3]



Slika 2 Proces taljenja [3]

Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja plinova iz atmosfere i ionizacijom osigurava vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Zaštitni plin na mjesto zavarivanja dovodi se kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice (Slika 2). Električni luk uspostavlja se između elektrodne žice (spojene na „+“ pol izvora istosmjerne struje) i osnovnog materijala. Električni luk je usmjereno kretanje elektrona kroz ionizirani prostor između dviju elektroda termoemisijom i emisijom električnog polja za kojeg ne vrijedi Ohmov zakon, te on mora biti konstantne duljine, a njegovo gibanje mora biti jednoliko da bi se ostvarila jednolika kvaliteta zavora. Taljenje dodatnog materijala i njegov prijenos u talinu praćen je pojavom sila, kao što su elektromagnetska i gravitacijska, sile od strujanja i eksplozije plinova, sile od pritiska plazme, te sila od površinske napetosti. Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk. Kod MAG postupka zavarivanja najčešće se koriste žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Osim punih žica koriste se i praškom punjene žice, a mogu se koristiti sa ili bez plinske zaštite (same sebi stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre). Pune žice dobivaju se hladnim vučenjem, dok se punjene žice proizvode raznim načinima proizvodnje od kojih je najzastupljeniji od metalne trake (debljine do 0,5 mm) koja se savija po duljini i puni bazičnim ili rutilnim praškom. Zavarivanje žicom punog presjeka moguće je u svim položajima, dok se kod praškom punjene žice zavaruje u vodoravnom i okomitom položaju. Ograničenje kod MAG postupka može biti pojava poroznosti, štrcanja i naljepljivanje uslijed neodgovarajuće tehnike rada i izbora parametara za zavarivanje. Na kvalitetu zavarenog spoja upravo ti parametri imaju velik utjecaj koji se biraju obzirom na vrstu i debljinu materijala, oblik spoja i položaj zavarivanja. Parametri MAG postupka zavarivanja prema [3] su:

- Struja zavarivanja

Ovisi o debljini i vrsti materijala, položaju zavarivanja, definirana je brzinom dodavanja žice (veća brzina → veća jakost struje) i promjerom žice (veći promjer → veća struja), utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena, dubinu protaljivanja, oblik zavora, te na količinu unesene topline.

- Brzina zavarivanja

Potrebno ju je uskladiti sa količinom taline jer može doći do naljepljivanja uslijed

prevelike brzine zavarivanja i male količine taline i obrnuto, utječe na produktivnost i bira se u zavisnosti od jačine struje i položaja zavarivanja.

- Duljina slobodnog kraja žice

U zavisnosti od jačine struje razlikuju se tri međusobno zavisna položaja slobodnog kraja žice i mlaznice za zaštitni plin: 1. slobodni kraj žice manji od odstojanja mlaznice, za struje od 50 do 150 A, 2. slobodni kraj žice jednak odstojanju mlaznice, za struje od 150 do 350 A i 3. slobodni kraj žice veći od odstojanja mlaznice, za struje iznad 350 A.

- Napon električnog luka

Ovisi od duljine luka (duži luk → veći napon → širi i nizak zavar), utječe na način prijenosa metala, te protaljšivanje, širinu i izgled zavara.

- Induktivitet

Induktivitetom se regulira brzina promjene struje pri kratkim spojevima i prijelaznom luku.

- Položaj zavarivanja

Ovisno o položaju zavarivanja primjenjuju se i različiti prijenosi metala. Kod horizontalnog i vodoravnog položaja to su štrcajući i prijelazni, dok se kod svih ostalih položaja primjenjuje prijenos kratkim spojevima i impulsni prijenos metala. Kod prisilnih položaja koriste se elektrodne žice manjih promjera.

- Tehnika zavarivanja

Postoje tri osnovne tehnike zavarivanja a to su: 1. Lijeva tehnika - širi zavar i manja penetracija, koristi se za tanje materijale, 2. Okomito (neutralno) širi zavar i srednja penetracija, 3. Desna tehnika - uži zavar i veća penetracija, koristi se za deblje materijale.

- Protok i vrsta zaštitnog plina

Zaštitni plin osigurava područje zavara od reakcije s plinovima iz atmosfere te ima velik utjecaj na oblik profila zavara tj. širinu i penetraciju, brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka.

2.1. PRIJENOS METALA U ELEKTRIČNOM LUKU

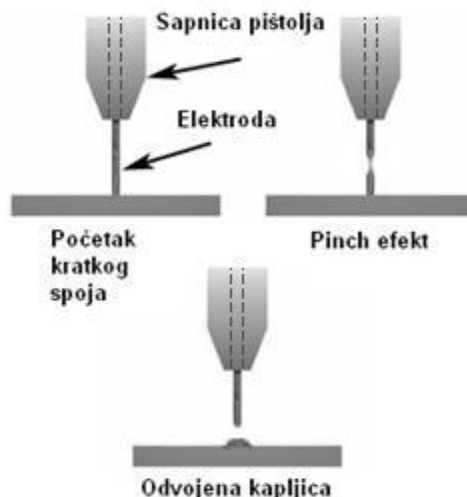
Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavora. Kod MIG/MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer je odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajući prijenos metala koji za odabranu primjenu predstavlja optimalan odabir. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja. [4]

Metode prijenosa metala ovise o jakosti struje, naponu električnog luka, vrsti dodatnog materijala i promjeru žice, vrsti zaštitnog plina ili plinske mješavine. Dije se na:

1) Prijenos kratkim spojevima

Ovim načinom prijenosa metala dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizikalnom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spoja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi u ovoj prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizikalnom kontaktu sa rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile, koja se javlja na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja i steže kapljicu taline vrha žice. Ova pojava je još poznata i kao „pinch effect“. Ovaj prijenos metala u luku daje talinu malog volumena koja se brzo hladi pa je pogodan za zavarivanje tankih limova i korijena zavora kod debljih komada, a najčešće se vrši u zaštiti ugljičnog dioksida i njegovih mješavina. [5]

Kod prijenosa kratkim spojevima, ovisno o promjeru žice, koriste se male struje zavarivanja, te zaštitni plin CO₂ ili mješavine (CO₂ + Ar, CO₂ + Ar + O₂) Za promjer žice od 1,2 mm koriste se struje od 50 A do 170 A i naponi od 13 V do 21 V.[4].

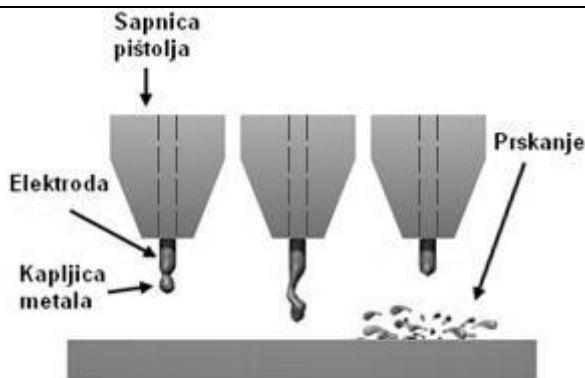


Slika 3 Prijenos kratkim spojevima [5]

2) Prijenos prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu žice elektrode koja se zatim pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkog spoja. Pojedine kapljice, ovisno o duljini električnog luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj. Prijelazni luk se javlja u području jakosti struja i napona između vrijednosti prijenosa kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Promjer kapljice metala veći je od promjera žice kojom se zavaruje. Proces zavarivanja s prijenosom metala prijelaznim lukom teško se kontrolira, javlja se intenzivno prskanje, slabije je kvašenje taline, što uzrokuje nepotpuno spajanje materijala, a površina zavareske je izbrazdana i nepravilna. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem. [5]

Za postizanje prijenosa metala krupnokapljicaštim prijenosom za promjer žice od 1,2 mm, prikladne su veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i naponi (od 22 V do 25 V). [4]

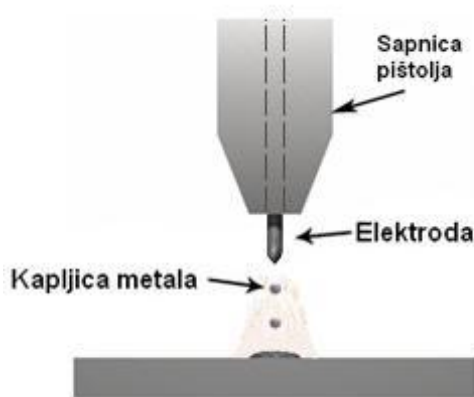


Slika 4 Prijenos prijelaznim lukom [5]

3) Prijenos štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom, kontinuirano dovođena žica elektrode se tali u području većeg napona i veće jakosti struje zavarivanja pri čemu se stvara mlaz malih kapi koje aksijalno putuju kroz električni luk te velikim brzinama uranjaju u rastaljeni osnovni materijal. Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu pa se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona. [5]

Koristi se relativno visoki napon (od 24 V do 40 V) i struja (200 A do 600 A) za žicu promjera 1,2 mm. [4]

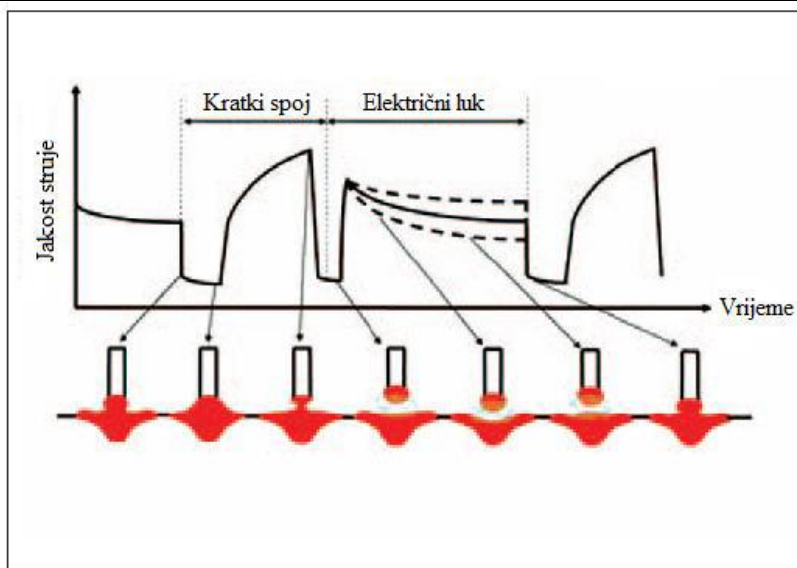


Slika 5 Prijenos štrcajućim lukom [5]

3. CONTROLLED BRIDGE TRANSFER (CBT)

MIG/MAG postupak prikladan je za zavarivanje tankih limova ali je u području minimalnog unosa topline tj. kratkom luku osjetljiv na štrcanje rastaljenih kapljica kao posljedica nestabilnog procesa. Potrebno je naglasiti da prvenstveno automobilska industrija (zbog primjene tankih limova) kontinuirano zahtijeva od proizvođača opreme za zavarivanje razvoj u smjeru produktivnosti ali i smanjenja naknadne obrade kako bi se smanjila količina industrijskog otpada i dodatni troškovi nastalih uklanjanjem posljedica štrcanja. Kao trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine štrcanja, koristi se impulsno MIG/MAG zavarivanje ali se bilježi i uporaba modificiranih MIG/MAG postupaka zavarivanja. Konvencionalno MIG/MAG zavarivanje kratkim spojevima, pomoću kojeg je moguće smanjiti unos topline u radni komad, koristi se kako bi se eliminiralo protaljivanje tanjih radnih komada. No, pri korištenju konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja dolazi do veće količine štrcanja i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka odmah nakon prekida kratkog spoja. Opisana problematika rezultirala je razvojem novog načina prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja – CBT načina prijenosa materijala [4].

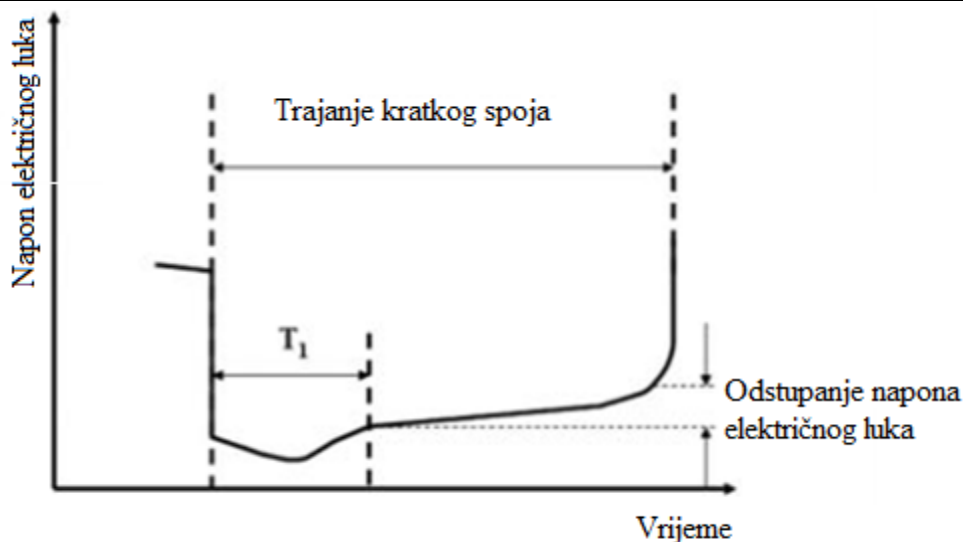
Kritični trenutak pojave štrcanja pri MIG/MAG zavarivanju kratkim spojevima je odmah nakon prekida kratkog spoja, odnosno u trenutku ponovne uspostave električnog luka. Kako bi se smanjila pojava štrcanja kada na rastaljeni metal djeluje sila pinch efekta, potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. U skladu s padom napona, u istom trenutku dolazi i do pada vrijednosti jakosti struje kao što je prikazano na slici 6. Kao rezultat toga, prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši se isključivo pomoću površinske napetosti. [4]



Slika 6 Princip CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [4]

Trenutak u kojem se odvija odvajanje kapljice može zbog utjecaja različitih čimbenika (duljina slobodnog kraja žice; brzina zavarivanja; položaj zavarivanja; veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala; ponašanje taline) varirati. Kako bi se izbjegao utjecaj navedenih čimbenika, jakost struje zavarivanja podešava se optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka. Na taj način moguće je upravljati prijenosom metala za vrijeme kratkog spoja i stabilizirati električni luk.

Princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja prikazan je na slici 7. Uspoređujući slike 6 i 7, vidljivo je da nakon pojave kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti s padom jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava štrcanja. Period kratkog spoja u kojem napon još nije počeo rasti označen je s T_1 i napon u tom području se smatra referentnim naponom. Daljnje odstupanje od referentnog napona učestalo se mjeri te kada odstupanje dosegne definiranu graničnu vrijednost, dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka. [4]



Slika 7 Princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja [4]

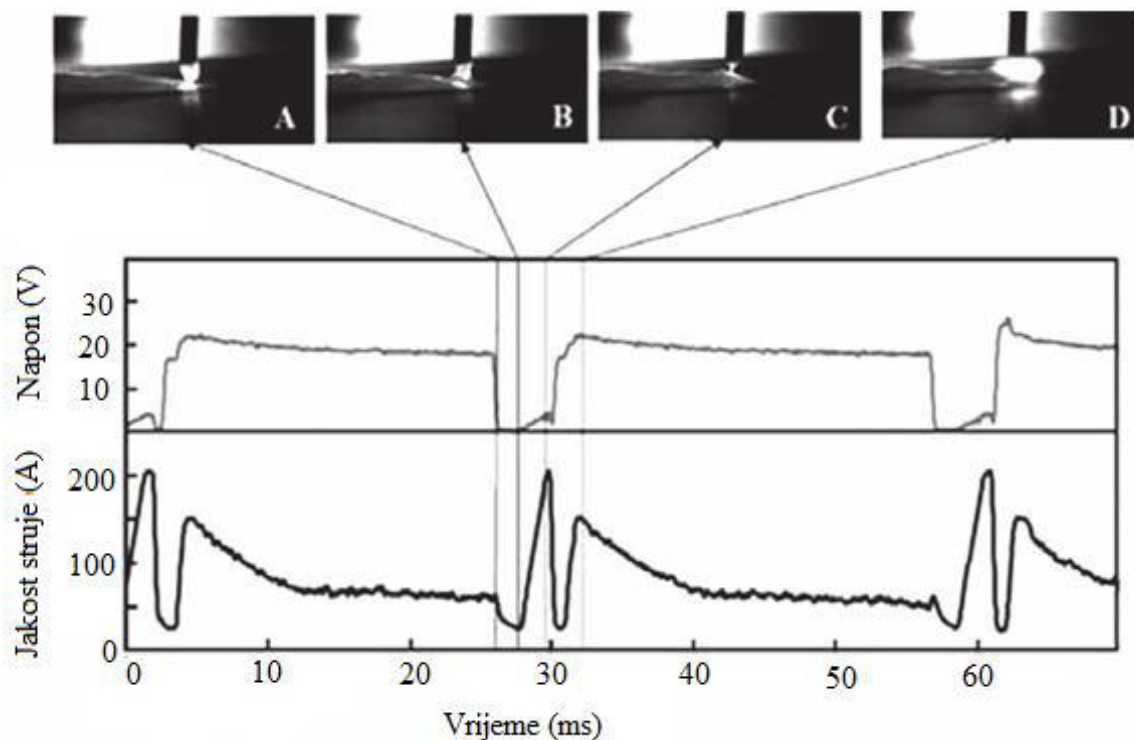
Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80 % Ar + 20 % CO₂ optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1,2 V do 2,0 V. Preciznim predviđanjem uspostave električnog luka i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnog luka, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti i štrcanje se uspijeva kontrolirati [4].

Prikaz prijenosa rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni materijal (pri CBT načinu prijenosa metala) pomoću visokobrzinske kamere u korelaciji s promjenom struje i napona dan je na slici 8. Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju navedeni su u tablici 1. [4]

Tablica 1 Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [4]

Zaštitni plin	80% Ar + 20% CO ₂
Jakost struje, A	80
Napon, V	16,2
Promjer žice, mm	1
Brzina zavarivanja, cm/min	50

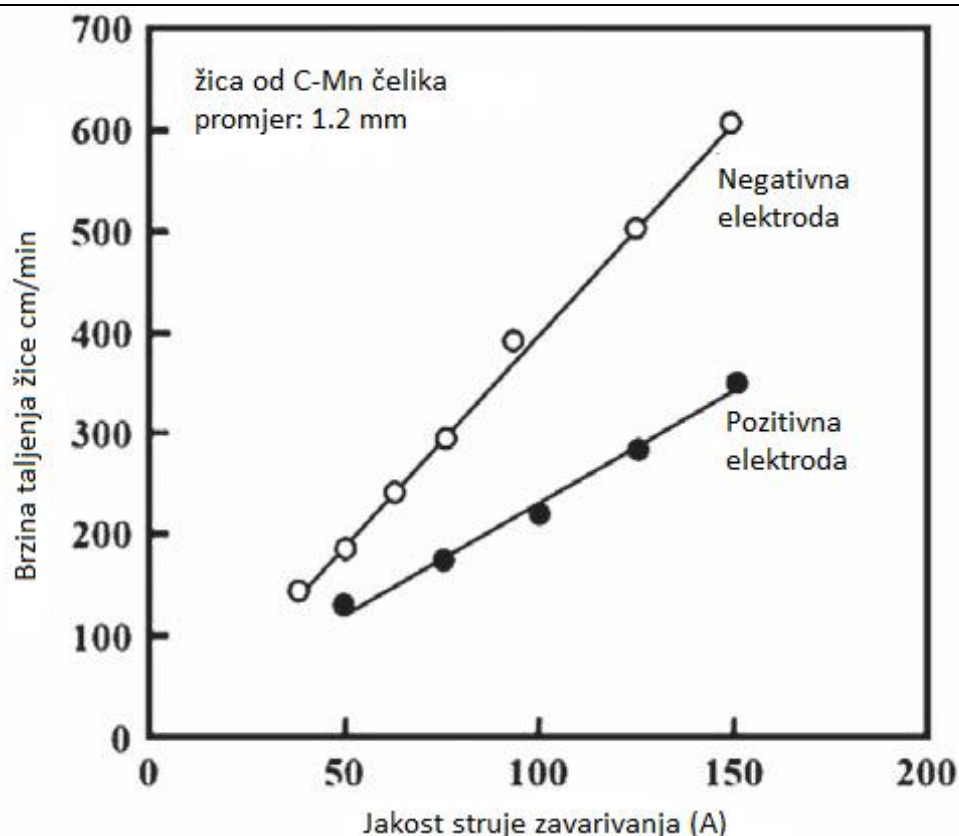
Kadar A na slici 8 prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkog spoja. Prolaskom vremena na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavora, te njen stisnuti oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, kadar D, ne dolazi do pojave štrcanja. [4]

**Slika 8 Faze CBT prijenosa metala ovisno o vremenu [4]**

Pomoću opisanog načina prijenosa moguće je precizno nadziranje procesa odvajanja rastaljene kapljice metala u svrhu predviđanja trenutka pojave kratkog spoja/ponovne uspostave električnog luka čime se minimalizira pojava štrcanja. Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline omogućuje se zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala (što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije) [4].

CBT – EN način prijenosa metala

CBT način prijenosa metala se može koristiti kod zavarivanja sa žicom spojenom na negativni pol (Electrode Negative; u daljnjem tekstu EN-CBT) što omogućuje mali unos topline i smanjeno štrcanje. Pri EN-CBT postupku količina topline u žici je veća nego u osnovnom metalu. Zbog toga je brzina taljenja žice (depozit) pri EN-CBT veća nego kod CBT postupka sa žicom spojenom na pozitivan pol. Na slici 9 se može vidjeti usporedba brzine taljenja žice promjera 1,2 mm kada je spojena na pozitivan pol i kada je spojena na negativan pol u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂. Kod zavarivanja s EN-CBT postupkom vrijednost struje zavarivanja je 2/3 vrijednosti struje kod zavarivanja s pozitivnom elektrodom pri jednakoj količini depozita. Ili drugim riječima, EN-CBT omogućuje manji unos topline pri jednakom količinom depozita nego kod zavarivanja s elektrodom spojenom na pozitivan pol [1].



Slika 9 Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu [1]

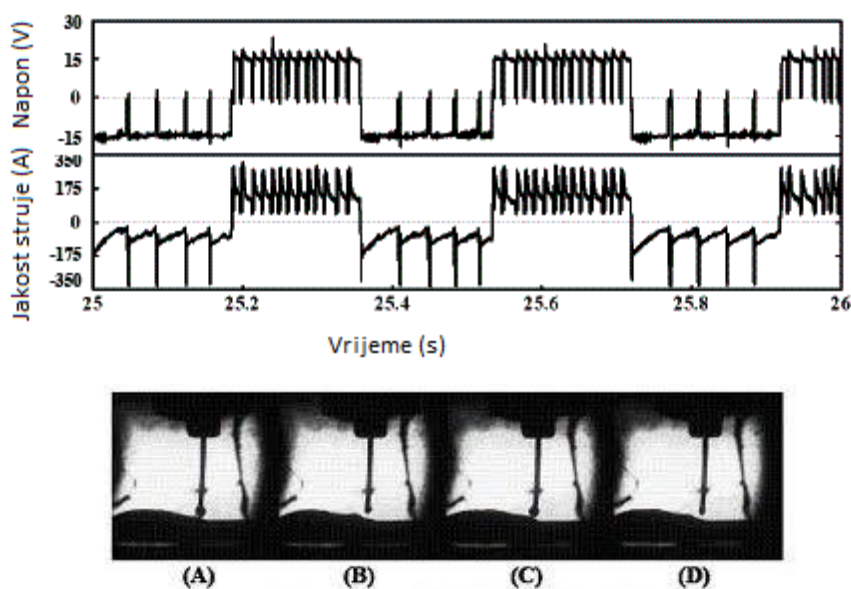
AC - CBT način prijenosa metala

AC – CBT (Alternative Current – CBT) postupak je inačica klasičnog CBT postupka gdje se koristi izmjenična struja s malom frekvencijom izmjene pozitivnog i negativnog pola. Vrijeme trajanja negativnog i pozitivnog pola se mjeri pomoću frekvencije i omjera negativnog i pozitivnog pola. Iako je brzina taljenja žice za vrijeme negativnog polariteta otprilike 1,5 puta veća, može se postići stabilan prijenos metala za vrijeme oba polariteta. Ta stabilnost se prvenstveno postiže pomoću novo razvijenih uređaja i mikroprocesora koji omogućuju preciznu kontrolu karakteristika električnog luka (jakost struje, napon) za vrijeme oba polariteta. Slika 10 prikazuje prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri AC-CBT načinu prijenosa metala snimljen visokobrzinskom kamerom s mogućnošću snimanja 6000 slika u sekundi. Prijenos rastaljene kapljice je snimljen u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Parametri korišteni pri zavarivanju su navedeni u tablici 2. [1]

Tablica 2 Parametri zavarivanja AC-CBT metodom prijenosa metala [1]

Zaštitni plin	80% Ar + 20% CO ₂
Jakost struje, A	100
Napon, V	15,0
Promjer žice, mm (YGW12)	1,2
Brzina zavarivanja, cm/min	50
Frekvencija, Hz	3,0
Omjer + i - pola, %	50

Kadar A na slici 10 prikazuje trenutak prijenosa metala u vrijeme mjerenja ekvivalentan trenutku mjerenja jakosti struje i napona od 25 sekundi. U tom trenutku električni luk je u drugoj polovici pri negativnim polaritetom. Kadar B prikazuje rastaljenu kapljicu u trenutku ponovnog uspostavljanja električnog luka nakon prolaska kratkog spoja. Kadar C prikazuje trenutak od 25,2 sekunde neposredno prije prelaska polariteta iz negativnog u pozitivan. Vidljivo je da rastaljena kapljica ima gotovo identičan oblik i veličinu kao u kadru A. Na kadru C se vidi da je štrcanje spriječeno i kod ponovne uspostave električnog luka neposredno nakon promjene polariteta [1].



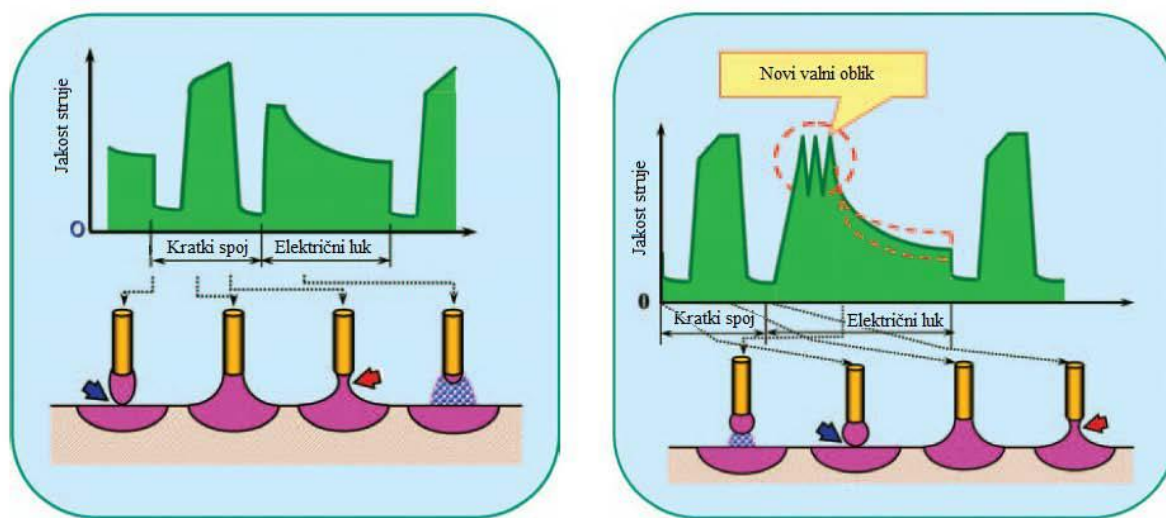
Slika 10 Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [1]

Prednost ovog postupka je smanjivanje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Kao rezultat toga, uz preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal ostvareno

je i jednostavno kontroliranje oblika zavora. Isto tako se smanjila pojava štrcanja do 6 puta s obzirom na klasični AC – MAG [1].

CBT - EX način prijenosa metala

Konvencionalnim CBT načinom prijenosa metala moguće je smanjiti pojavu štrcanja samo u rasponu parametara koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. Pojačavanjem parametara dolazi se do krupnokatličastog (globularnog) prijenosa metala koji se koristi kako bi se povećala proizvodnost procesa i brzina zavarivanja. U tom rasponu parametara više nije moguće koristiti konvencionalni CBT postupak zavarivanja već ga je potrebno nadograditi, odnosno primijeniti novu inačicu: eng. *Controlled Bridge Transfer – Expanded*, CBT – EX. Slika 17 prikazuje princip rada CBT – EX MAG postupka zavarivanja. Smanjenje pojave štrcanja prije ponovne uspostave električnog luka slična je kao i u slučaju CBT MAG postupka zavarivanja. No, da bi se u krupnokatličastom prijenosu predvidjela ponovna uspostava električnog luka, razvijen je novi visokoprecizni i visokobrzinski Welbee mikroprocesor. Osim predviđanja uspostave električnog luka pomoću ovog mikroprocesora moguće je formirati rastaljenu kapljicu metala odgovarajućih dimenzija i oblika na samom vrhu elektrode i to pomoću fine regulacije duljine električnog luka [6].



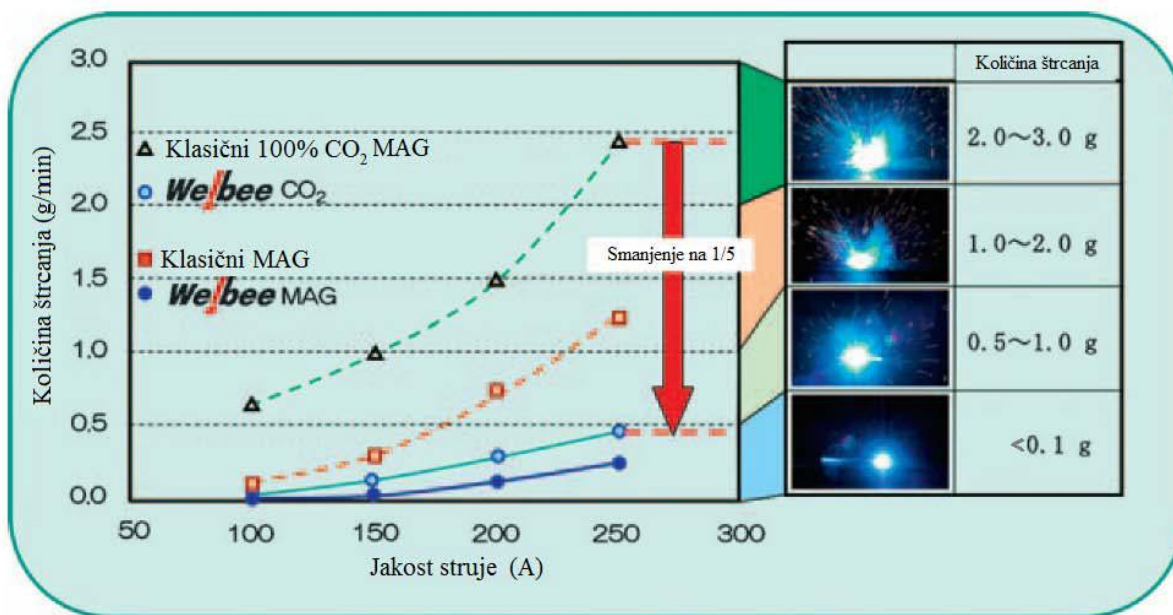
Slika 11 Općeniti valni oblik struje za MAG zavarivanje (lijevo) i valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO₂ zaštiti [6]

Na slici 11 - lijevo prikazan je općeniti valni oblik struje za MAG zavarivanje. Vidljivo je da u trenutku prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učina taljenja dodatnog materijala s obzirom na to da je kod krupnokatličastog

prijenosa metala brzina dodavanja žice veća nego što je to u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima. Kako bi se nadoknadio gubitak energije, zbog smanjenja jakosti struje kratkog spoja, i na taj način se postigla odgovarajuća veličina rastaljene kapljice metala, u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Nakon toga, jakost struje koja se mijenja u realnom vremenu ovisno o metodi prijenosa metala i ponašanju taline, regulira duljinu električnog luka. Novorazvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju što omogućava manji unos topline i veće brzine zavarivanja pa se stoga može primjenjivati kod zavarivanja korijena sučeljenog spoja cijevi.

Na slici 11 - desno je prikazan valni oblik struje pri zavarivanju u 100 % CO₂ zaštiti. Uzrok štrcanju pri krupnokapljicaštom prijenosu metala su eksplozije plina u talini i/ili rastaljenoj kapljici zbog pregrijavanja visokom strujom zavarivanja. Zbog karakteristične primjene CBT-EX tehnologije zavarivanja (zavarivanje velikim brzinama), potrebno je održavati kratki električni luk. Kratki električni luk može uzrokovati povremenu pojavu kratkih spojeva što dovodi do hlađenja metala zavara. Štrcanje pored navedenih pojava može uzrokovati i djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu zbog disocijacije ugljičnog dioksida (CO₂) na ugljični monoksid (CO) i kisik (O₂). Da bi se spriječilo i izbjeglo djelovanje odbojne sile na kapljicu izvršena je promjena u valnom obliku struje. Promjena se očituje u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka (Slika 11). Na takav način se postiže stabilan prijenos metala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju krupnokapljicašti prijenos metala [2].

Slika 12 prikazuje usporedne rezultate pojave štrcanja pri variranju jakosti struje (od 100 A do 250 A) i tehnologije zavarivanja (konvencionalni MAG i CBT – EX MAG). Korišten je dodatni materijal promjera 1,2 mm, a brzina zavarivanja iznosila je 100 cm/min. Najveća razlika u količini štrcanja primijećena je kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO₂. U navedenom slučaju je pri CBT – EX MAG zavarivanja postignuto smanjenje štrcanja na 20 % (0,5 g/min) od ukupne količine štrcanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja (2,5 g/min). Kod MAG – M zavarivanja postignuta je minimalna količina štrcanja od 0,25 g/min.[6]







Slika 12 Rezultati pojave štrcanja pri CBT-EX MAG i konvencionalnom zavarivanju [6]

Izvori struje za CBT postupak zavarivanja

U novije vrijeme sve više se koriste inverterski ispravljači koji su znatno lakši i pogodniji za upotrebu od ostalih izvora struje za zavarivanje. Dodatna prednost invertera je njihova povećana efikasnost jer su gubici u željeznoj jezgri transformatora manji u odnosu na konvencionalne transformatore pa je stupanj iskorištenja invertera veći od svih ostalih izvora zavarivanja. U tablici 3 klasificirane su četiri generacije digitalnih invertera te su prikazane njihove osnovne karakteristike [4].

Tablica 3 Klasifikacija digitalnih invertera [4]

	Prva generacija 1996-2000	Druga generacija 2001-	Treća generacija 2008-	Četvrta generacija 2010-
Uređaj za zavarivanje				
Procesor	16-bit CPU	32-bit CPU	FPGA	ASIC
Vrijeme obrade podataka	100 μ s	25 μ s	1 μ s	20 ns
Kapacitet procesora	1	4	16	64

Prva generacija koja je razvijena 1996. godine koristi 16-bitni procesor s vremenom obrade podataka od 100 μ s. Radi usporedbe s ostalim generacijama snaga procesora prve generacije označena je s 1. Druga generacija invertera razvijena je između 2001. i 2007. godine te su bili korišteni 32-bitni procesori s vremenom obrade podataka od 25 μ s i snagom povećanom četiri puta. Treća generacija, koja je poveznica do četvrte generacije, razvijena je 2008. godine i ima vrijeme obrade podataka manje od 1 μ s i snagu procesora označenu sa 16. Novorazvijeni visokobrzinski Welbee mikroprocesor pripada zadnjoj, četvrtoj generaciji invertera, a razvijen je 2010. godine. Brzina obrade podataka kod Welbee mikroprocesora je oko 20 ns i snaga procesora je povećana na 64 puta u odnosu na prvu generaciju. Velika brzina obrade podataka omogućuje Welbee mikroprocesoru visokobrzinsku i visokopreciznu kontrolu dinamičke karakteristike jakosti struje i napona izvora struje.[4]

Uloga zaštitnog plina pri MAG zavarivanju

Odabir zaštitnog plina za željenu primjenu je ključno za kvalitetu izvedbe zavarenog spoja jer zaštitni plin utječe, prije svega, na mehanička i metalurška svojstva zavarenog spoja. Provodi se na temelju brojnih kriterija od kojih su neki: vrsta dodatnog materijala, željena mehanička svojstva zavarenog spoja, debljina osnovnog materijala, priprema zavara, stanje osnovnog materijala (korozija, antikorozivne prevlake, masnoće), željeni način prijenosa metala u električnom luku, položaj zavarivanja, željeni profil zavara itd. Tri su osnovna parametra za razumijevanje svojstava zaštitnih plinova: ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost i reaktivnost plina. [7]

Funkcija zaštitnog plina pri zavarivanju prema [8] jest:

- zaštita procesa i rastaljenog metala od pristupa okolnog zraka,
- određivanje načina prijenosa materijala,
- definiranje oblika i strukture električnog luka,
- utjecaj na kemijski sastav zavarenog spoja,
- definiranje izgleda i geometrijskog oblika zavarenog spoja,
- utjecaj na viskozitet taline (metalne kupke),
- utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja.

4. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

Visokolegirani Cr-Ni čelici

Visokolegirani Cr-Ni čelici pojavili su se početkom 20. stoljeća, točnije 1912. godine kada ih je patentirao proizvođač čelika Krupp i od tada su u konstantnom razvoju. U posljednjih 25 godina proizvodnja visokolegiranih čelika se udvostručila iz čega se vidi njihova važnost u industriji. Nazivaju se još nehrđajući čelici (eng. stainless steel) i korozijski postojani čelici. Obilježja visokolegiranih Cr-Ni čelika su minimalan udio kroma od 10,5% i dodatak još nekih legiranih elemenata kao što su nikel, molibden, titan, bakar, dušik i ugljik kojima se modificira njihova struktura ili poboljšavaju svojstva obradivosti, čvrstoće, žilavosti na sniženim temperaturama ili korozijske postojanosti. Zbog korozijske postojanosti prvenstveno se koriste za specifičnu primjenu ili specifični okoliš. Visokolegirani Cr-Ni čelici definirani su nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI), a u našem okruženju ustalila se upotreba oznaka prema američkom standardu AISI (American Iron and Steel Institute) i to vjerojatno zbog utjecaja brodogradnje [9].

Visokolegirani Cr-Ni čelici dijele se prema mikrostrukturi na četiri osnovne grupe:

- feritni čelici
- austenitni čelici
- dupleks (austenitni-feritni) čelici
- martenzitni čelici

Feritni čelici

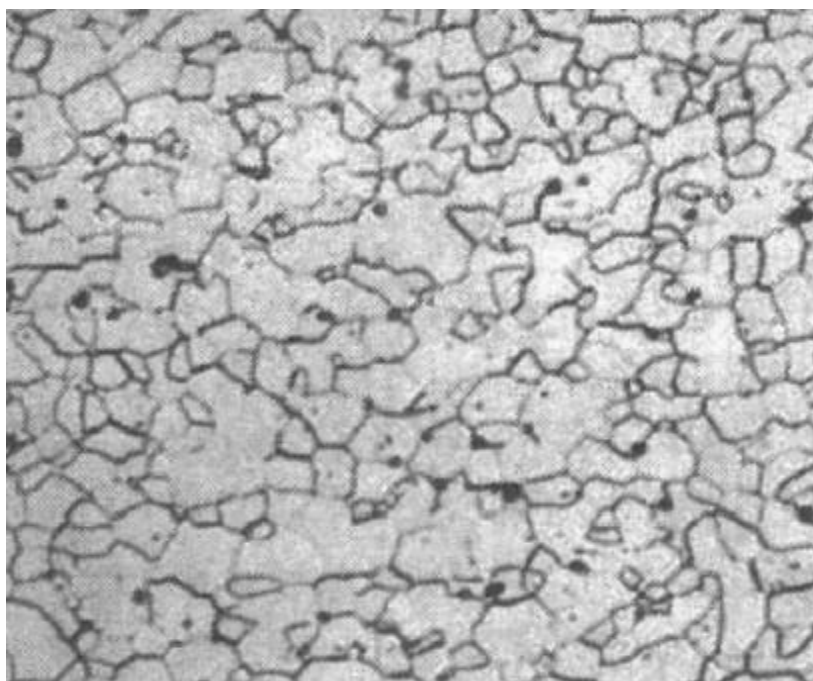
Feritni čelici sadrže $<0,1\%$ C i 13...17% Cr i zbog toga zadržavaju feritnu mikrostrukturu (slika 13) pri gotovo svim temperaturama pa se ne mogu zakaliti.

Primjenjuju se u brušenom ili fino poliranom žarenom stanju [10].

Osnovna svojstva feritnih čelika su [10]:

- relativno su mekani

- magnetični su
- slabo oblikovljivi deformiranjem
- bolje obradivi odvajanjem česticama od austenitnih čelika
- postojeći su prema oksidirajućim kiselinama i neosjetljivi na plinove koji sadrže sumpor, za razliku od Cr-Ni čelika
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama (morska voda)
- niže su cijene od ostalih nehrđajućih čelika
- skloni lomljivosti pri niskim temperaturama



Slika 13 Mikrostruktura feritnog čelika [11]

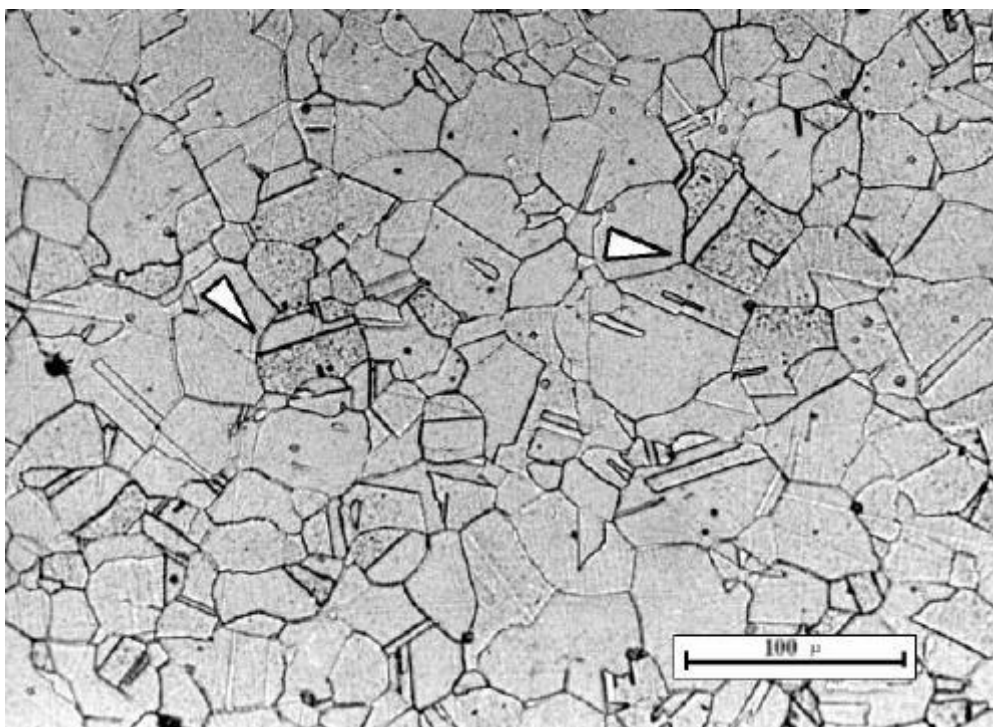
Austenitni čelici

Radi se o visokolegiranim čelicima s Cr i Ni (Mn) koji proširuju austenitno područje sve do normalnih temperatura (do 200 °C) [10].

Neka od svojstva austenitnih čelika jesu [10]:

- nemagnetični zbog austenitne mikrostrukture (slika 14)

- dobro oblikovljivi u hladnom stanju, a hladnom deformacijom mogu očvrsnuti (vučena žica ili hladnovaljane trake)
- uz dodatno legiranje s Mo, W i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama $>600^{\circ}\text{C}$
- zbog zadovoljavajuće žilavosti pri sniženim temperaturama primjenjuju se teorijski do -273°C
- otporni na organske i anorganske kiseline, lužine i soli



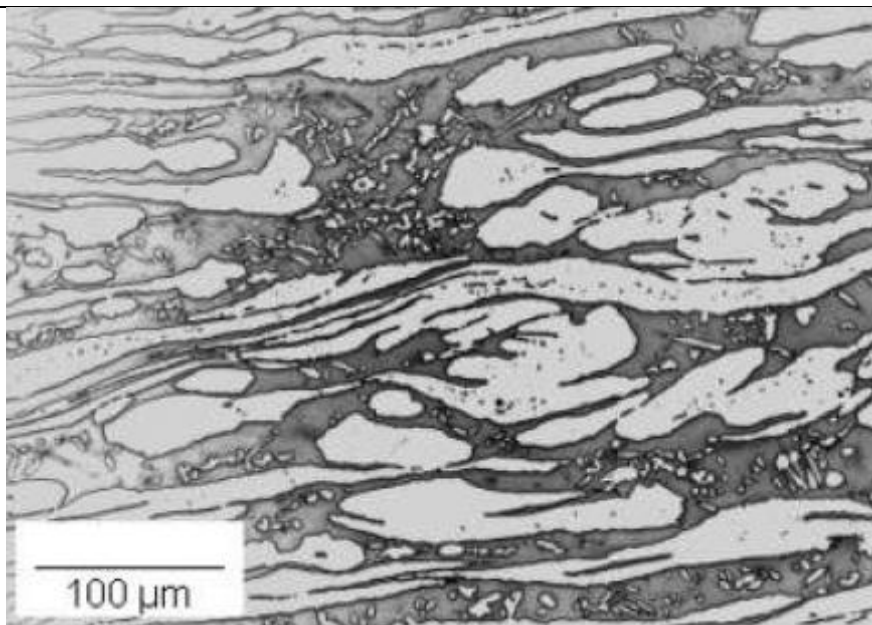
Slika 14 Mikrostruktura austenitnog čelika [11]

Dupleks čelici

Čelici iz ove skupine nemaju monofaznu mikrostrukturu, nego dvofaznu austenitno - feritnu s 40 do 60 % ferita (slika 15). Na taj se način odstupilo od nužnog uvjeta postojanosti na opću koroziju, ali je zato povećana postojanost na napetosnu koroziju u kloridnom okolišu kao i na H_2S . Vrlo je velika postojanost na jamičastu koroziju.

Dvofaznost čelika može izazvati teškoće pri zavarivanju zbog sklonosti krhkosti ferita i mogućnosti izlučivanja karbida po granicama zrna ferit/austenit.

Sve je šire područje primjene ovih čelika u industriji nafte i plina, papira, petrokemijskoj i kemijsko-procesnoj industriji, brodogradnji, za cisterne na vozilima i drugo [10].



Slika 15 Mikrostruktura dupleks čelika [11]

Martenzitni čelici

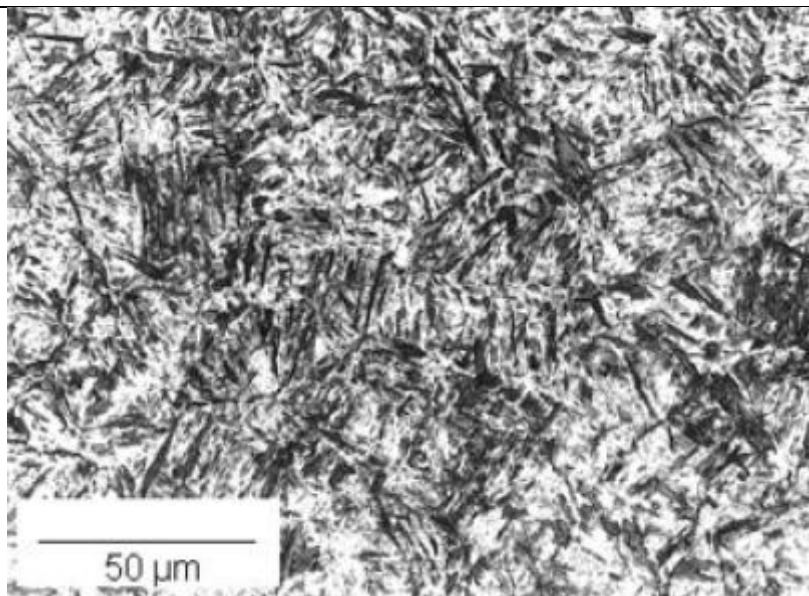
Zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen maseni udio ugljika (0,15...1,0 % C), te u pravilu preko 13% Cr. Moguće je legiranje s Mo i Ni [10].

Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika (<0,30 % C) od alatnih i popuštaju se pri višim temperaturama (poboljšavaju se).

Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtijeva postepeno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili u vakuumu (i zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši %C i %Cr, to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozijske postojanosti).

Kod konstrukcijskih čelika u prvom je planu korozijska postojanost, a kod alatnih dodatno i otpornost na abrazijsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju često dvofaznu martenzitno-karbidnu mikrostrukturu čija je korozijska postojanost manja od čiste martenzitne mikrostrukture (slika 16).

U odnosu na feritne i austenitne čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje [10].



Slika 16 Mikrostruktura martenzitnog čelika [11]

Zavarljivost nehrđajućih čelika

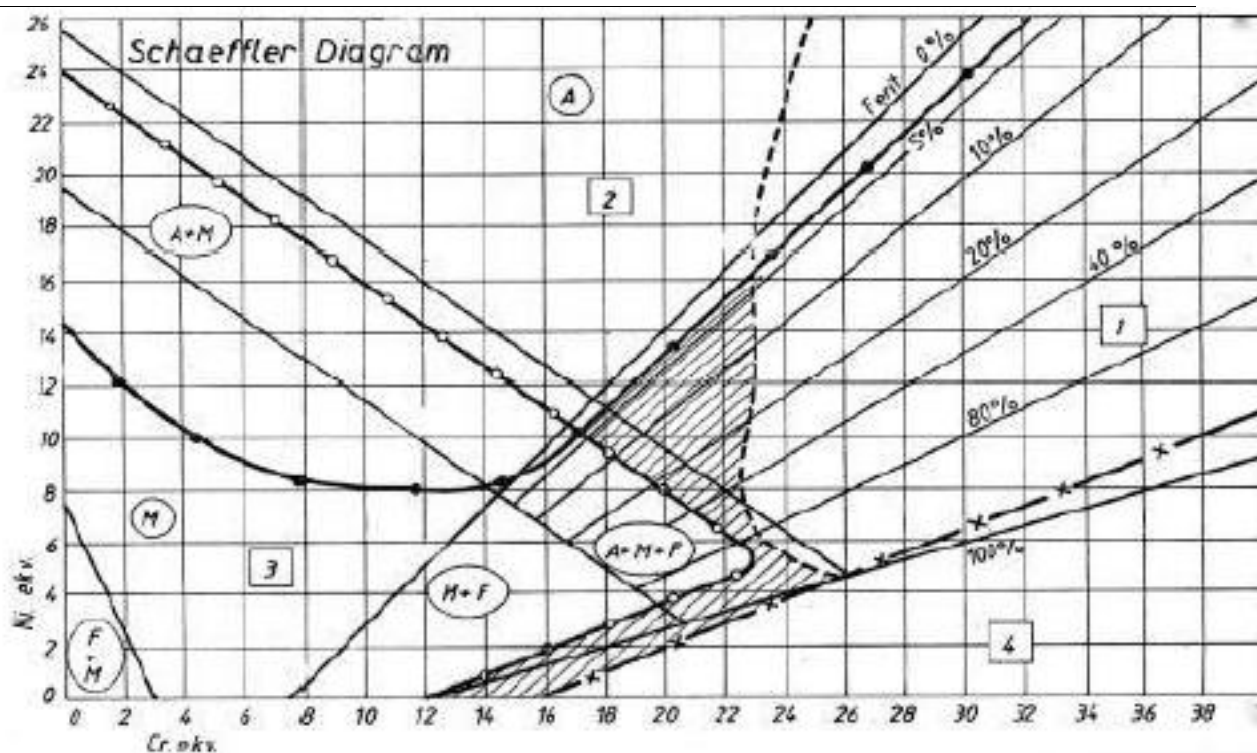
Čvrstoća i pouzdanost proizvoda mogu se osigurati samo ako nema krhkih međuslojeva u području zavarenog spoja. Zbog toga je neophodno ispravno procijeniti strukturu i svojstva pojedinih zona zavarenog spoja. Uvid u postizivu mikrostrukturu na osnovi kemijskog sastava daje Schaeffler-ov dijagram koji je prikazan na slici 17. Osim toga, pomaže i u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja [12]:

- Cr-ekvivalenta (Cr_{ekv}) koji izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (tzv. α -geni elementi):

$$Cr_{ekv} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb$$

- Ni-ekvivalenta (Ni_{ekv}) koji izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje austenita (tzv. γ -geni elementi):

$$Ni_{ekv} = \%Ni + 30 \%C + 0,5 \%Mn$$



Slika 17 Schaeffler-ov dijagram [12]

U Schaeffler-ovom dijagramu postoje četiri osnovna strukturna područja koja su razgraničena pravicima i označena početnim slovima naziva strukture koja nastaje [12]:

1. Kod ovog područja na temperaturama od 500 °C do 900 °C dolazi do pojave krhke σ - faze u osnovnom i dodatnom materijalu što rezultira povećanom krhkošću. U austenitno feritnom polju najviše su skloni čelici s više od 10 % δ – ferita (α – faze),
2. Ovo područje obuhvaća uglavnom materijale s austenitnom i djelomice austenitno - martenzitnom strukturom. Iznad 1250 °C materijali su skloni toplim pukotinama. Rješenje za zavarivanje materijala u tom području je korištenje dodatnog materijala koji u strukturi metala zavariva osigurava 3 – 10 % ferita,
3. U ovom području nalaze se zavareni spojevi s krhkom martenzitno – austenitnom i martenzitno – feritnom strukturom. Vrlo su skloni pojavi hladnih pukotina ispod 400°C. Predgrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom žarenjem može se riješiti problem hladnih pukotina. Ovo područje prekriva i jedan dio područja 2 u prekrštenom dijelu te može doći i do pojave toplih pukotina,
4. Ovo područje obuhvaća veliki dio čistog ferita i djelomično austenita, time i korozijski postojeće čelike s vrlo niskim sadržajem ugljika. Iznad 1100 °C dolazi do jakog rasta

kristalnog zrna te su posljedice krhkost, znatno smanjenje žilavosti te sklonost pukotinama u području zvara i zone utjecaja topline. Područje optimalnog sastava zavarenog spoja i dobre zavarljivosti u dijagramu je označeno šrafurom.

Opća pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika [9]:

- područje zvara mora biti čisto i glatko obrađeno (bez masnoća, vlage, premaza i drugih nečistoća),
- alati i brusne ploče ne smiju sadržavati karbide (koriste se aluminijski oksidi),
- sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor,
- pjeskarenje se vrši čistim pijeskom,
- predgrijavanje je obavezno za feritne i martenzitne nehrđajuće čelike,
- vrlo je važan pravilan odabir dodatnog materijala.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Uvod

Eksperimentalni dio završnog rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U svrhu usporedbe karakteristike električnog luka, osmišljen je pokus prema kojem su varirani faktori brzina dodavanja žice i način prijenosa metala. Na taj način je bilo moguće analizirati utjecaje navedenih faktora na profil navara, količinu štrcanja i unos topline u osnovni materijal.

Korišteni izvor struje za zavarivanje je Daihen Varstroj Welbee P500L. Navarivanje je izvedeno u zaštitnoj atmosferi plina Messer Inoxline C2 (97,5% Ar + 2,5% CO₂). Brzina navarivanja bila je konstantna u vrijednosti od 30 cm/min. U oba dijela pokusa izvedeno je prvo impulsno, pa zatim CBT MAG navarivanje. Dobiveni rezultati su potom obrađeni i analizirani.

Izvor struje za zavarivanje

Tvrtka Daihen Varstroj predstavila je najnoviju generaciju izvora struje za MAG zavarivanje sa modelom WB P500L. To je prvi izvor struje za zavarivanje sa Welbee procesorom napravljenim nano tehnologijom.



Slika 18 Daihen Varstroj WB P500L [16]

Tehničke karakteristike izvora struje su navedene u tablici 4, a korisničko sučelje je prikazano slikom 19.



Slika 19 Korisničko sučelje WB P500L

Na korisničkom sučelju podešen je način rada i parametri zavarivanja. U većini slučajeva prvo se podešava struja zavarivanja, međutim, u našem slučaju bila je određena brzina dodavanja žice te se prema tome automatski podešavala jakost struje i napon. Odabrani dodatni materijal je puna žica promjera 1,2 mm proizvođača Elektroda Zagreb, model MIG 309 LSi od nehrđajućeg čelika. Kod odabira plina korišten je mod *MIG (2,5% CO₂)*. Za odabir metode zavarivanja kod prvog dijela pokusa za CBT način korišten je mod *DC LOW SPATTER*, dok je kod drugog dijela za impulsno MAG zavarivanja korišten mod *DC PULSE*.

Tablica 4 Tehničke karakteristike izvora struje WB P500L

Izvor struje	WB P500L	
Način rada	DC	impulsno
Priključni napon [V]	400 +/- 15%	
Nazivna ulazna snaga [kVA]	25	
Struja zavarivanja [A]	30-500	30-400
Napon zavarivanja [V]	12-39	12-34
Težina [kg]	83	
Dimenzije (D×Š×V) [mm]	710×395×592	
Intermitencija	60%	80%
Statička karakteristika	Ravna - Constant Voltage	

Zaštitni plin

U eksperimentalnom dijelu rada korišten zaštitni plin je Inoxline C2 proizvođača Messer.

Tijekom izrade pokusa, protok plina bio je isti za sva stanja pokusa u vrijednosti od 17 l/min.

Inoxline C2 je , prema normi HRN EN ISO 14175, plinska mješavina koja se sastoji od 97,5% Ar i 2,5% CO₂ (Tablica 5).

Tablica 5 Zaštitni plinovi za zavarivanje i rezanje [13]

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav [%]						Postupak po HRN EN 14610	Primjena
		Ar	He	O ₂	CO ₂	H ₂	N ₂		
Inoxline C2	M12	97,5	-	-	2,5	-	-	MAG M	Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni

Dodatni materijal

Korišten dodatni materijal u eksperimentalnom dijelu je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb, trgovačkog imena MIG 309 LSi, promjera 1,2 mm prema normi HRN EN ISO 14343-A, tehničkih svojstava prema slici 20.

EZ - MIG 309 LSi

NORME

HRN EN ISO 14343-A	AWS / ASME SFA-5.9	W. Nr.
G 23 12 L Si	ER 309 LSi	1.4332

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Austenitna nehrđajuća puna žica za MIG/MAG zavarivanje namijenjena prvenstveno za zavarivanje raznorodnih spojeva, pri čemu se dobija zavar koji je duktilan i otporan na nastanak pukotina. Također, žica se primjenjuje za navarivanje sloja nehrđajućeg čelika na obični čelik, tzv. platiranje.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_5 %	KV (+20°C) J
> 320	> 510	> 25	≥ 130

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

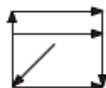
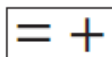
	C	Mn	Si	Cr	Ni
%	≤ 0,02	2,0	0,8	23,5	14,0

ZAŠTITNI PLIN

M12 (Ar + 2,5% CO₂) ili M13 (Ar + 1 do 3% O₂)

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,8; 1,0; 1,2; 1,6	žica do žice (S-S)
12,5 kg - žičani kolut (promjer žice 0,8 mm)	
15 kg - žičani kolut (promjer žice 1,0; 1,2 i 1,6 mm)	



Slika 20 Specifikacija dodatnog materijala [15]

Navarivanje

Navarivanje je rađeno pomoću automata "Bugo systems" (Slika 21) koji održava konstantnu brzinu zavarivanja od 30 cm/min. Korištena tehnika navarivanja je neutralna. Pomoću etalona podešena visina slobodnog kraja žice je 15 mm. Za sva mjerenja korišteni su isti uvjeti i tehnika rada, jer ukoliko bi se mijenjali ne bi bila moguća vjerodostojna usporedba i analiza rezultata.



Slika 21 Postav eksperimenta za navarivanje

Navarivanje je provedeno na nehrđajućem čeličnom limu AISI 304 debljine 5 mm. U svrhu usporedbe impulsnog i CBT MAG zavarivanja na 2 različite razine unosa topline uz konstantnu brzinu zavarivanja od 30 cm/min i jednaki protok plina od 17 l/min, izvedena su 4 različita navara prema tablici 6.

Tablica 6 Parametri zavarivanja

Uzorak	Način prijenosa metala	Jakost struje [A]	Napon [V]	Očitano		Brzina dodavanja žice [m/min]	Unos topline [kJ/cm]
				Jakost struje [A]	Napon [V]		
1A	CBT	173	15,4	170	15,2	5,5	4,13
1B	IMPULSNO	132	19,6	143	20,2	5,5	4,62
2A	CBT	216	19,2	225	19,2	7,5	6,91
2B	IMPULSNO	180	21,7	182	22,7	7,5	6,61

Unos topline računa se prema izrazu:

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta$$

U – napon zavarivanja, V

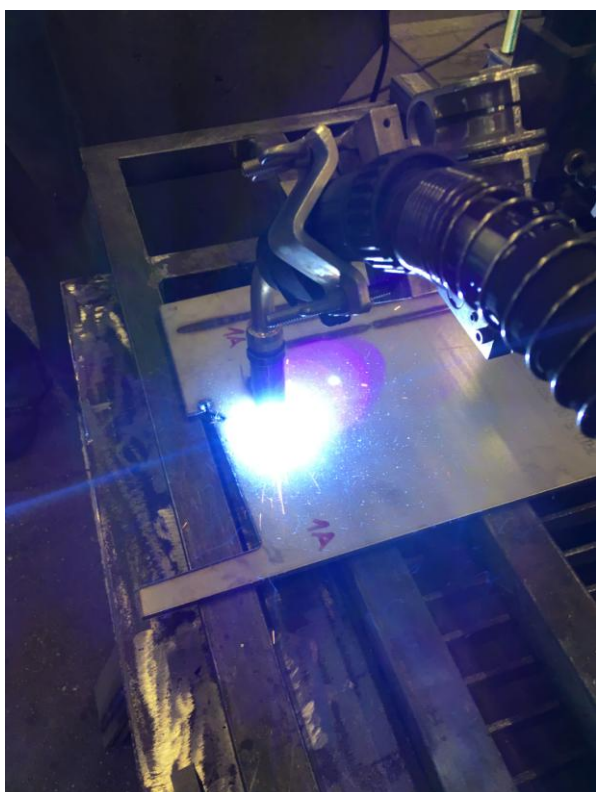
I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/s

η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (MAG = 0,8).

U prvom dijelu pokusa, kod navarivanja CBT načinom prijenosa metala (Slika 22), vidi se manja količina štrcanja i stabilniji električni luk, nego kod impulsnog načina prijenosa metala (Slika 23).

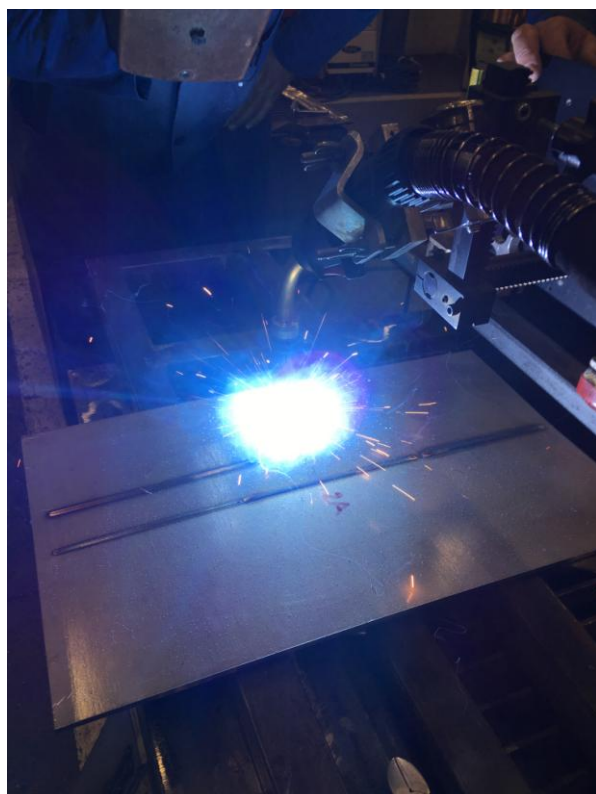
Također, u drugom dijelu pokusa kada je povećana brzina dodavanja žice s prvobitnih 5,5 m/min na 7,5 m/min, CBT način prijenosa metala (Slika 24) ima i dalje manje štrcanje te je električni luk stabilniji nego impulsnim načinom prijenosa metala (Slika 25).



Slika 22 Navarivanje - uzorak 1A (CBT)



Slika 23 Navarivanje - uzorak 1B (impulsno)



Slika 24 Navarivanje - uzorak 2A (CBT)



Slika 25 Navarivanje - uzorak 2B (impulsno)

Glavne karakteristike osnovnog materijala - AISI 304

AISI 304 je austenitni, 18/10 Cr-Ni čelik, otporan na kiseline, koji je zbog niskog postotka ugljika interkristalično otporan nakon zavarivanja kod debljine limova do 6 mm i bez naknadne toplinske obrade. Dopusćen je za primjenu na temperaturama do 300°C. Zavarljivost je dobra svim električnim postupcima. Plinsko zavarivanje se ne smije primjenjivati. Ima vrlo dobru podobnost poliranja i dobru sposobnost preoblikovanja dubokim vučenjem, oblikovanja valjanjem itd.

Prilikom rezanja potrebno je zbog tendencije prema hladnom očvršćivanju primjeniti oštro brušene alate iz brzoreznog čelika ili iz tvrdog metala.[14]

Čelik je otporan na vodu, vodenu paru, vlažnost zraka, konzumne kiseline, kao i na slabe organske i anorganske kiseline i ima mnogostrane mogućnosti primjene, npr. u prehrambenoj industriji, u proizvodnji pića, u mljekarstvu, pivarstvu i podrumarstvu, u farmakološkoj i kozmetičkoj industriji, u izradi kemijskih aparata, arhitekturi, aumobilskoj industriji, za kućanske predmete i aparate, za kirurške instrumente, sanitarne uređaje itd. [14]

Tablica 7 Kemijski sastav AISI 304 [14]

Kemijski element	C	Cr	Ni	Fe	Mn	P	S	Cr	Si
%	< 0,08	18 - 20	8 - 10,5	66,345 - 74	< 2	< 0,045	< 0,03	17 - 19,5	< 1

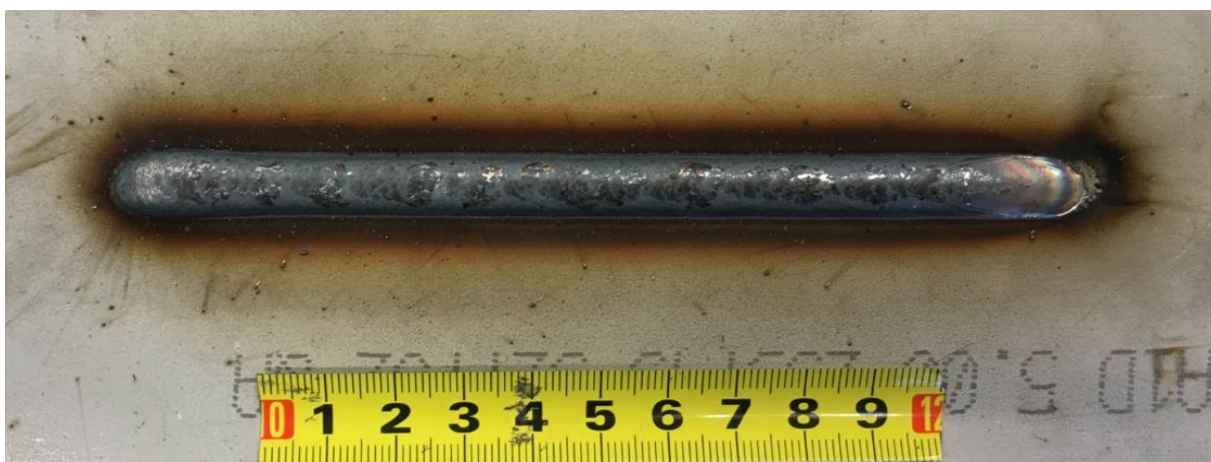
Analiza rezultata

Analizom mogu se usporediti profil i izgled navara kod impulsnog MAG i CBT MAG zavarivanja na 2 različite brzine dodavanja žice.

U prvom dijelu pokusa, kod navarivanja brzinom dodavanja žice od 5,5 m/min vidi se puno veće štrcanje kod impulsnog načina (Slika 23), nego što je kod CBT načina prijenosa metala (Slika 22). Kod impulsnog je puno šira zona zacrnjenja, te se vidi veća količina nataljenog oksida na površini navara. CBT načinom prijenosa metala postiže se čišći i uži zavar.

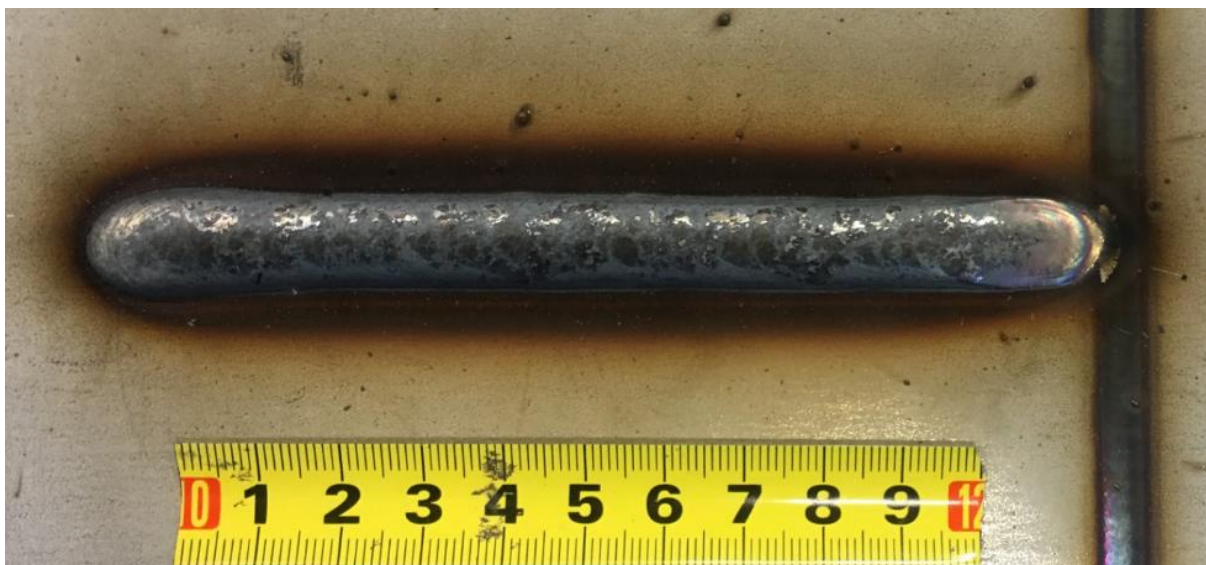


Slika 22 Rezultat navarivanja uzorka 1A



Slika 23 Rezultat navarivanja uzorka 1B

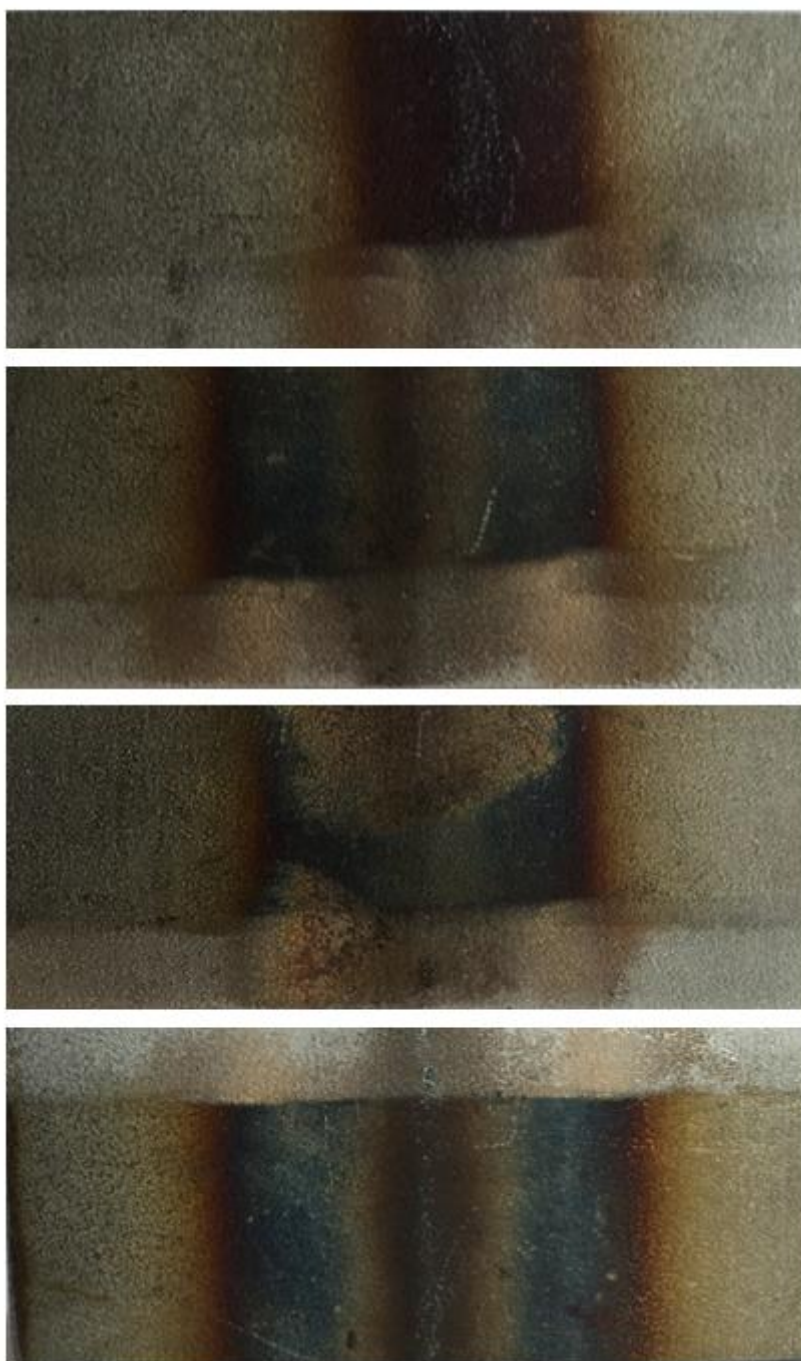
U drugom dijelu pokusa, kod brzine dodavanja žice od 7,5 m/min je veća količina nataljenog dodatnog materijala što se i vidi prema širinama navara. U ovom slučaju je opet šira zona zacrnjenja kod impulsnog zavarivanja (Slika 25) nego kod CBT načina prijenosa metala (Slika 24), ali je ta razlika puno manje uočljiva nego u prvom dijelu pokusa sa manjom brzinom dodavanja žice. Štrcanje je opet veće kod impulsnog zavarivanja. Zavar je uredniji kod CBT.



Slika 24 Rezultat navarivanja uzorka 2A



Slika 25 Rezultat navarivanja uzorka 2B



Slika 26 Izgled površine uzoraka sa stražnje strane

Prema slici 26, moguće je usporediti uzorke prema izgledu pozadine navara. Prema gornjem dijelu slike (dijelovi 1A i 1B) očita je puno manja zona utjecaja topline kod CBT načina (1A), nego što je kod impulsnog (1B). Također, kod povećanja brzine dovođenja žice na 7,5 m/min, dolazi se do istog zaključka, ali uz manju razliku zone utjecaja topline kod CBT načina (1B) u odnosu na impulsno (2B).

Priprema uzoraka

Nakon analiziranja rezultata navarivanja pojedinih uzoraka, potrebno je pripremiti ispitne uzorke.

Prvo se ploče režu plinskim postupkom na veće dijelove, te se nakon toga režu na manje dijelove tračnom pilom poprečno u odnosu na liniju navara.

Zatim slijedi brušenje. Brušenje je obavljeno na uređaju Phoenix Alpha Grinder/Polisher (Slika 27) brusnim papirima različitih veličina zrnatosti: P320, P500, P1000, P2000, P4000. Brzina brušenja je 350 okr/min. Kod mijenjanja rotacijskih brusnih papira s grubljeg na finiji papir, uzorci se rotiraju za 90°. Koristi se vodeno hlađenje, tako da nebi došlo do zagrijavanja uzorka. S finijim papirom se brusi sve dok se tragovi brušenja prethodnog, grubljeg, papira skroz ne izbruse.



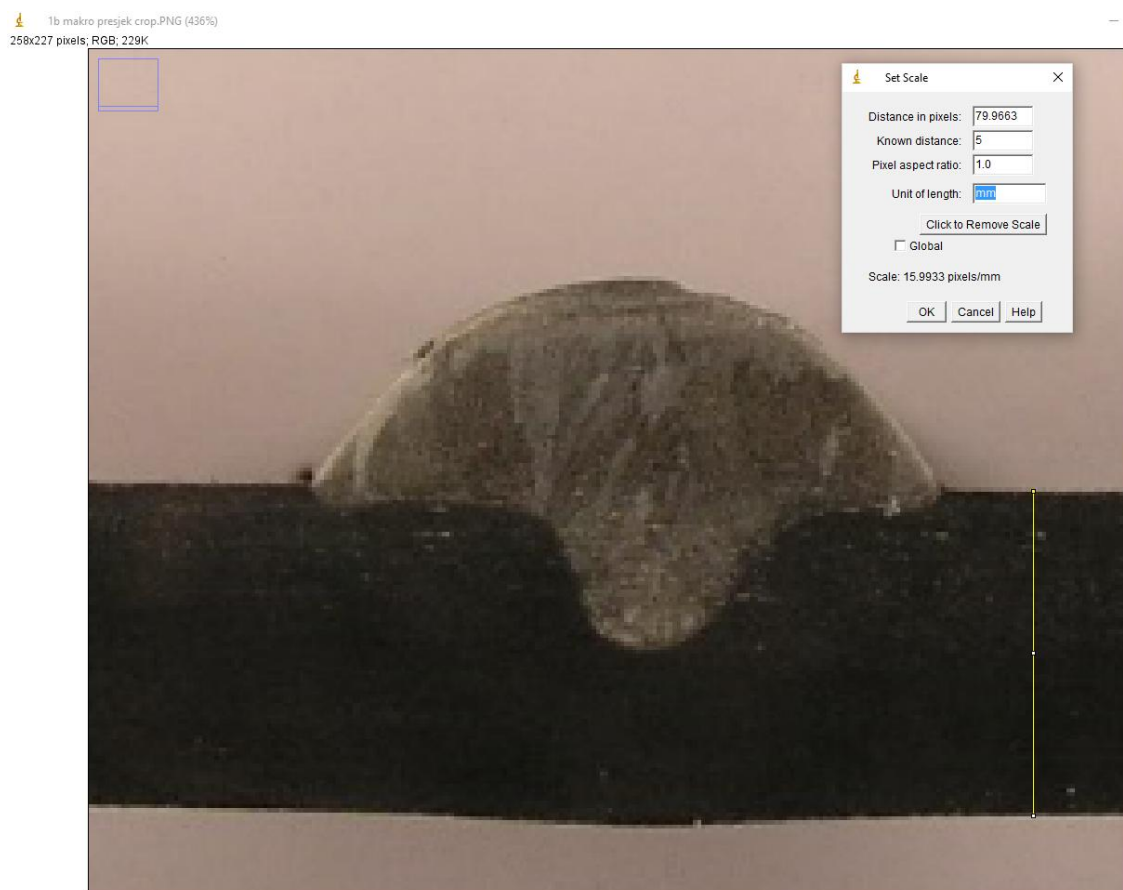
**Slika 27 Uređaj za brušenje makro uzoraka
Phoenix Alpha Grinder/Polisher**

Nakon brušenja, uzorci se nagrizzaju u 10 %-tnoj oksalnoj kiselini, u Laboratoriju za zaštitu materijala. Prvo nagrizzanje je obavljeno pod naponom od 8V u trajanju od 2,5 min. Zbog preslabog nagrizzanja, postupak je ponovljen pojačanim naponom na 10V u trajanju od još 2 min.

Uzorci se zatim slikaju namještenim fotoaparatom Canon, u Laboratoriju za materijalografiju, s mjernom trakom koja služi za određivanje dimenzija širine zavora i penetracije. U tablici 8 prikazani su makroizbrusci nakon nagrizzanja u oksalnoj kiselini.

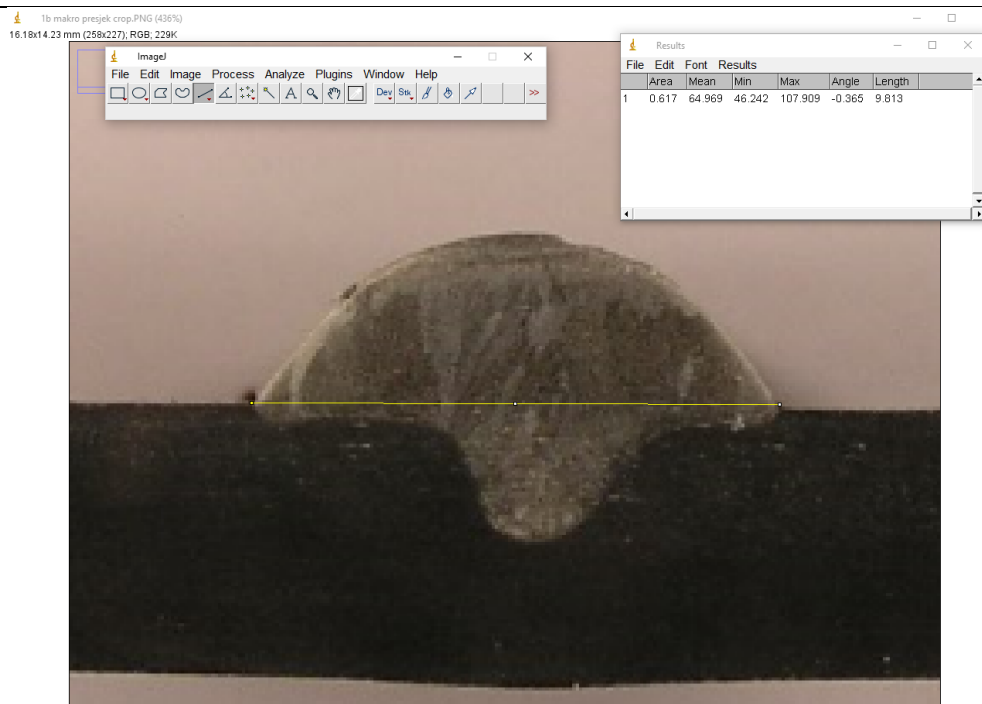
U cilju detaljnije analize, potrebno je izmjeriti nadvišenje, širinu, penetraciju i površinu presjeka metala navara koristeći program "ImageJ".

Koristeći naredbu "Set scale", prvo se postavlja mjerna skala prema poznatoj debljini osnovnog materijala od 5 mm, te se tako dobije odnos piksela po milimetru (Slika 28).

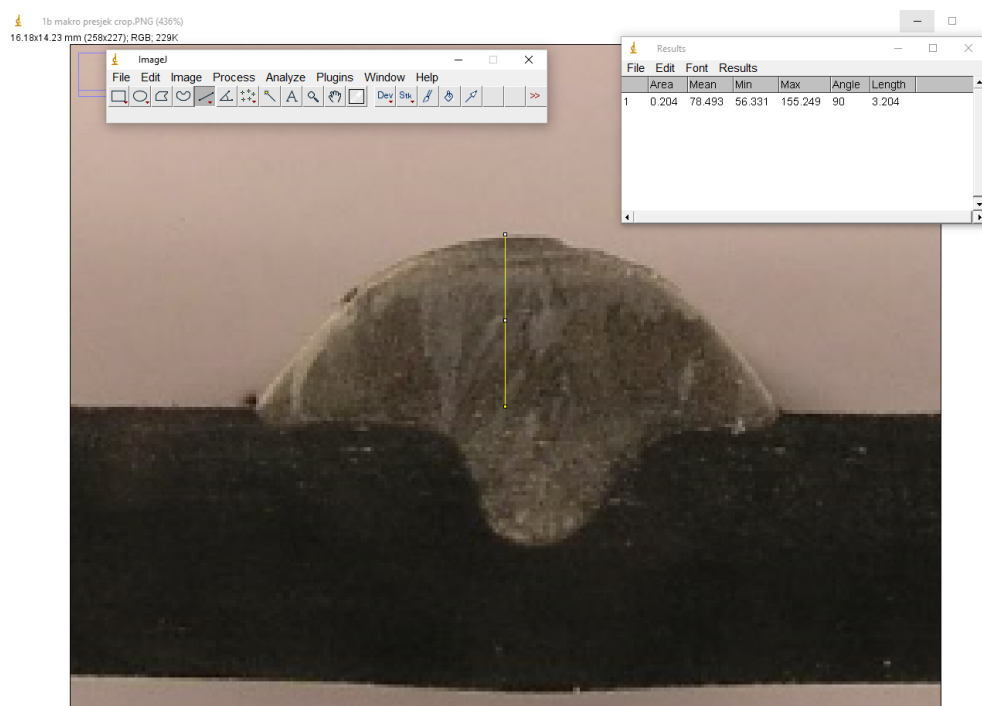


Slika 28 Postavljanje skale na točnu dimenziju debljine osnovnog materijala u programu ImageJ

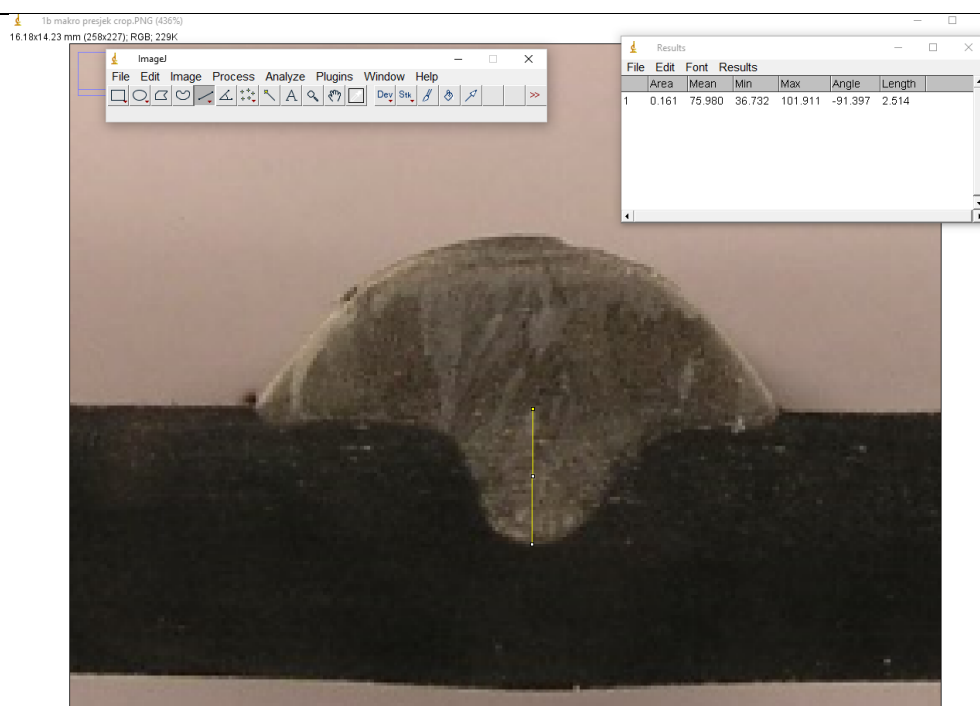
Primjer mjerenja širine navara prikazan je na slici 29, nadvišenja na slici 30, penetracije na slici 31 i površine metala navara na slici 32.



Slika 29 Mjerenje širine navara pomoću programa ImageJ



Slika 30 Mjerenje nadvišenja pomoću programa ImageJ

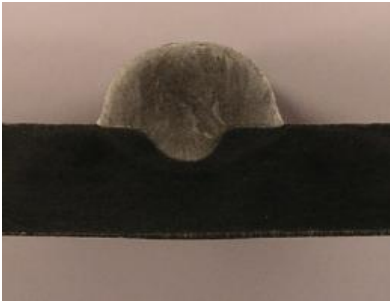





Slika 31 Mjerenje penetracije pomoću programa ImageJ



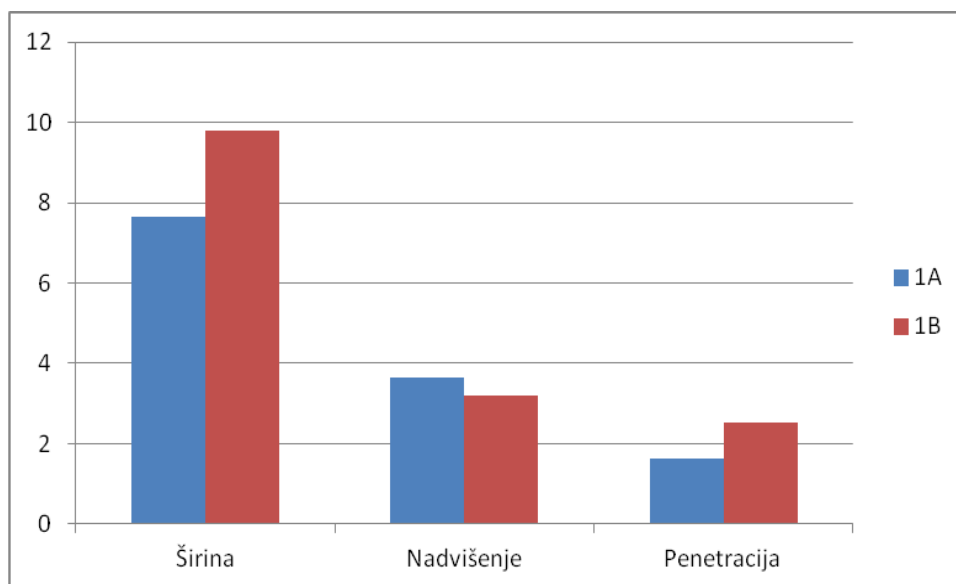
Slika 32 Mjerenje površine pomoću programa ImageJ

Tablica 8 Geometrijska analiza makroizbrusaka

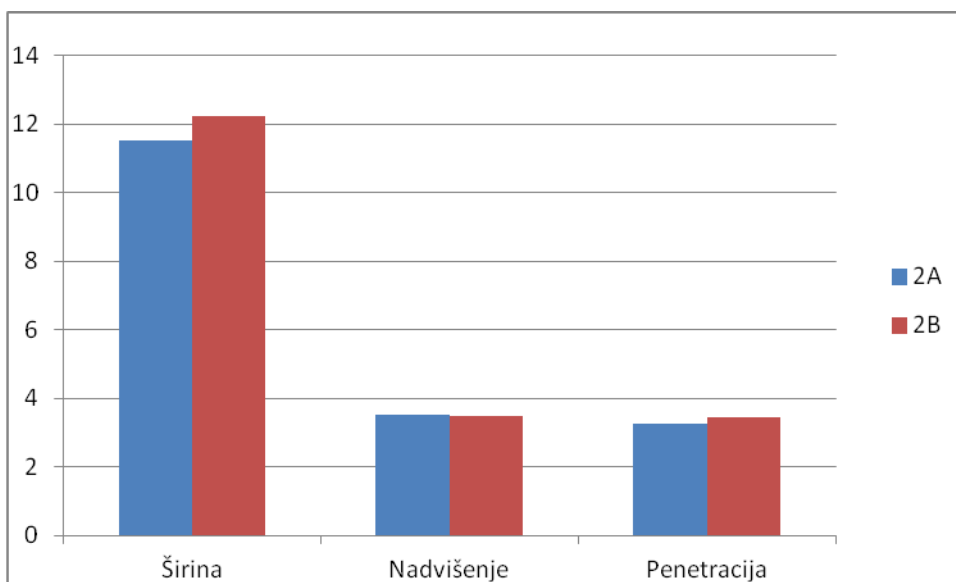
Oznaka uzorka	Način prijenosa metala	Slika makroizbruska	Širina, mm	Nadvišenje, mm	Penetracija, mm	Površina, mm ²
1A	CBT		7,66	3,66	1,62	26,35
1B	IMPULSNO		9,81	3,20	2,51	30,83
2A	CBT		11,52	3,51	3,27	42,77
2B	IMPULSNO		12,22	3,49	3,44	43,48

Prema slikama makroizbrusaka vidljivo je da se CBT načinom prijenosa metala dobije obliji presjek metala navara, dok je impulsnim načinom prijenosa metala presjek metala navara širi i manjeg nadvišenja. Prema podacima dobivenim mjerenjem u programu ImageJ, CBT

načinom prijenosa metala ostvaruje se veća dubinska penetracija, manja površina navara i veća širina metala navara u odnosu na impulsni način prijenosa metala.



Slika 33 Grafički prikaz izmjerenih podataka uzoraka 1A i 1B



Slika 34 Grafički prikaz izmjerenih podataka uzoraka 2A i 2B

ZAKLJUČAK

Danas, MAG zavarivanje je najrašireniji postupak zavarivanja. Zbog česte upotrebe i sve težih zahtjeva u eksploataciji, teži se razvijanju postupka kroz optimiranje parametara zavarivanja, razvoj software-a, odabir optimalne mješavine zaštitnog plina, te njihovo djelovanje na kvalitetu zavarenog spoja i na mehanička svojstva konstrukcije.

MAG CBT je modificirani postupak zavarivanja koji je razvijen s ciljem uklanjanja pogrešaka do kojih se dolazilo koristeći konvencionalne MAG postupke. Tu se prvenstveno misli na uklanjanje ili smanjenje količine štrcanja koje uzrokuje potrebu za naknadnom obradom materijala i povećanje troškova proizvodnje. Pojava štrcanja se smanjuje korištenjem novorazvijenim, visokopreciznim i visokobrzinskim Welbee mikroprocesorom. Welbee mikroprocesor omogućuje smanjeni unos topline, stabilnije vođenje električnog luka i preciznom regulacijom duljine električnog luka formiranje rastaljene kapljice.

Eksperimentalnim dijelom se može jasno zaključiti da kod manjih struja zavarivanja, CBT načinom ostvaruje se puno čišći i uredniji zavar uz malo štrcanje i usku zonu zacrnjenja osnovnog materijala, nego što je kod impulsnog. Kod većih struja zavarivanja, CBT način ima iste prednosti, ali uz ipak manje razlike prema impulsnom načinu.

Geometrijskom analizom makroizbrusaka vidi se da CBT načinom ostvaruje se manja širina, a time i manja površina metala zavara, dok impulsnim načinom dobije se veća penetracija u osnovni materijal.

LITERATURA

- [1] Garašić, I.; Kožuh, Z.; Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju, Zavarivanje vol. 57, str. 85-92, Zagreb, 2014.
- [2] Böhme, D.; Nentwig A. W. E.; Knoch, R.: MAG zavarivanje s dvije žice - postupak za postizanje velike brzine zavarivanja, Zavarivanje 39, broj 1-2, str. 12-13, Zagreb, 1996.
- [3] GMAW Welding Guide,
http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf; dostupno 13.7.2016.
- [4] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M.: Pogreške u zavarenim spojevima, treće izdanje, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2007.
- [6] Era, T.; Uezono, T.; Kadota, K.; Ueyama, T.: Leading edge of current waveform control technology on digital inverter controlled welding power source and its peripheral equipment, Zavarivanje 57, 1/2, 5-16, 2004.
- [7] M. Suban, J. Tušek: Osnovne značilnosti zaščitnih plinov in njihovih mašanic za MIG/MAG varjenje, 1. del, Varilna tehnika, (1997) 1, pp 11-17
- [8] Garašić, Ivica: Zavarivanje u plinskoj zaštiti, tema 1.6, predavanje za specijalizaciju koordinatora zavarivanja, Zagreb, 2010.
- [9] Juraga, I.; Šimunović, V.; Stojanović, I.: „Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje“, Seminar: „Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici)“, Pula 2007., s interneta, <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/1.%20RAD.pdf> dostupno 30.5.2016.
- [10] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: "Svojstva i primjena materijala", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [11] Stainless steels; <http://www.acroni.si/assets/Uploads/Stainless-steels-Acroni.pdf> ; dostupno 30.5.2016.
- [12] Mateša, B.; Samardžić, I.; Dunder, M.: "Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama", Slavonski Brod, 2011.
- [13] Plinovi u bocama; <http://www.messer.hr/products/plinoviubocama/tabzavrez.pdf>; dostupno 29.8.2016.

-
- [14] Glavne karakteristike najznačajnijih nehrđajućih čelika; <http://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/glavne-karakteristike-najznacajnijih-nehrdjajucih-celika-inox.html> ; dostupno 29.8.2016.
- [15] Elektroda Zagreb; <http://www.ezg.hr/katalog.html> ; dostupno 02.09.2016.
- [16] Daihen Varstroj;
http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-500l-eng.html ; dostupno 07.09.2016.

PRILOZI

I. CD-R disc